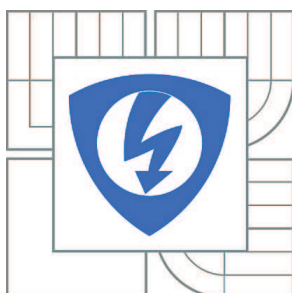


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC
TECHNOLOGY

TAVIDLOVÉ ZBYTKY PO PÁJENÍ PŘETAVENÍM

FLUX RESIDUES AFTER REFLOW SOLDERING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

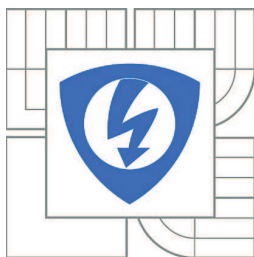
VÍT UHLÁŘ

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ STARÝ, Ph.D.

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Mikroelektronika a technologie

Student: Vít Uhlář

ID: 125330

Ročník: 3

Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Tavidlové zbytky po pájení přetavením

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou tavidel a tavidlových zbytků pájecích past po pájení přetavením. Navrhněte metodiku a proveďte měření povrchového izolačního odporu tavidlových zbytků vybraných pájecích past po pájení přetavením, po prodlevě ve vlhkostní komoře a po elektromigraci. U vybraných vzorků proměřte průběh kapacity a ztrátového činitele v závislosti na frekvenci. Proveďte měření ionizovatelných nečistot tavidlových zbytků po pájení konduktometrickou metodou. Proměřte roztékavosti vybraných vzorků pájecích past. Porovnejte dosažené výsledky a vyhodnoťte v relaci s technickými listy pájecích past.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 31.5.2012

Vedoucí práce: Ing. Jiří Starý, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt:

Cílem této bakalářské práce je seznámit se s problematikou tavidlových zbytků vzniklých po pájení přetavením ve vztahu k deskám plošných spojů. První část se zabývá uvedením do problematiky pájecích past a samotných tavidlových zbytků. Druhá část se zaměřuje na proces pájení přetavením. Třetí část je věnována metodice měření tavidlových zbytků. Závěrem práce je praktická část, ve které je shrnuta výroba zkušebních vzorků a obsahuje experimentální výsledky měření.

Abstract:

The aim of this bachelor thesis is to solve flux residue characteristics on PCBs after reflow soldering and compare different solder pastes. The first part deals with the issue of solder paste application and flux residues. The second part focuses on the process of reflow soldering. The third part is devoted to the measurement methodology of flux residues. Finally, project is a practical part, which is summarized in the production of test samples and contains measurement results.

Klíčová slova:

Deska plošných spojů, tavidlové zbytky, pájení přetavením, elektromigrace, teplotní profil, pájecí pasta, tavidlo, povrchový izolační odpor, ionizovatelné nečistoty, odpor výluhu roztoku, roztékavost, ztrátový činitel.

Keywords:

Printed circuit boards, flux residues, reflow soldering, electromigration, temperature profile, solder paste, flux, surface insulation resistance, ionic contamination, resistivity of solvent extract, wetting, loss factor.

Bibliografická citace mé práce:

UHLÁŘ, V. *Tavidlové zbytky po pájení přetavením*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 49 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Starý, Ph.D..

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma „**Tavidlové zbytky po pájení přetavením**“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 30. května 2012

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Starému, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování projektu. Dále bych chtěl poděkovat firmám Honeywell, Panasonic a SMTplus za poskytnutí pájecích past k testování. A ještě chci poděkovat Josefu Kryllovi za spolupráci při měření. Nakonec chci poděkovat rodině za podporu při studiu a vytváření práce.

Obsah

Úvod	7
1 Pájecí pasty a tavidlové zbytky	8
1.1 Pájecí pasty	8
1.2 Tavidlové zbytky po pájení přetavením.....	9
1.2.1 Koroze	11
1.2.2 Elektromigrace	12
1.3 Čištění tavidlových zbytků	13
2 Pájení přetavením	15
2.1 Metody pájení přetavením	15
2.1.1 Konvekční pájení	15
2.1.2 Pájení infračerveným zářením	16
2.1.3 Kondenzační pájení (pájení v párách).....	17
2.2 Teplotní profil v reflow peci	18
3 Metodika zkoušek	20
3.1 Měření povrchového izolačního odporu metodou SIR.....	20
3.2 Měření změny kapacity a ztrátového činitele na změně frekvence	21
3.3 Měření roztékavosti pájecí pasty	23
3.1 Měření ionizovatelných nečistot metodou ROSE a SEC.....	24
4 Praktická část	25
4.1 Výroba zkušebních vzorků a šablony	25
4.2 Měření a vyhodnocování	27
4.2.1 Měření a vyhodnocení vlivu pájecí pasty na povrchový izolační odpor metodou SIR	28
4.2.2 Měření a vyhodnocení smáčecího úhlu.....	30
4.2.3 Měření a vyhodnocení ztrátového činitele tg a kapacity C	32

4.2.4	Měření a vyhodnocení ionizovatelných nečistot metodou SEC	35
5 Závěr		37
Použité zdroje literatury.....		38
Seznam použitých zkratk a symbolů		39
Příloha A: Naměřené hodnoty povrchového izolačního odporu		40
Příloha B: Grafy závislosti kapacity a ztrátového činitele na frekvenci		44

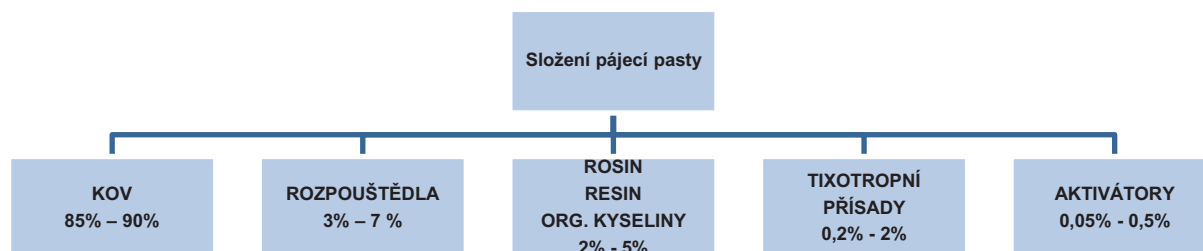
Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou tavidlových zbytků. První kapitola je zaměřena na problematiku pájecích past s hlediska jejich složení a použitelnosti v pájecím procesu. Následuje studium samotné problematiky tavidlových zbytků, které pojednává o jejich vzniku, poruchách, které vytvářejí, a jejich odstraňování. Další část této kapitoly se zabývá elektromigrací a korozí, které jsou spjaty s tavidlovými zbytky. Druhá kapitola rozebírá aktuální trendy v procesu pájení přetavením. Obsahuje informace o třech nejdůležitějších metodách a závěr kapitoly patří teplotnímu profilu, který je důležitý z hlediska kvality pájecího procesu. Třetí kapitola pojednává o jednotlivých metodách měření vlivů tavidlových zbytků na spolehlivost DPS. Kapitola obsahuje problematiku měření vlivů tavidlových zbytků na povrchový izolační odpor, elektromigraci. Dále se kapitola zabývá měřením ionizovatelných nečistot, měřením závislosti změny kapacity a ztrátového činitele na změně frekvence. Konec kapitoly je věnován testování roztékavosti pasty. Závěr práce patří shrnutí výrobního procesu zkušebních vzorků a šablony a zabývá se vyhodnocováním naměřených výsledků.

1 Pájecí pasty a tavidlové zbytky

1.1 Pájecí pasty

Pájecí pasty jsou směsi kovové složky (pájecích zrn práškovité pájky) a organické složky (tavidlo, aktivátor, rozpouštědlo) a reologických modifikátorů. Složení pájecí pasty je na Obr. 1. Hlavní výhodou pájecích past je nanášení nadefinovaného množství pájky a tavidla na pájený spoj. Na pájecí pasty jsou kladeny stále vyšší požadavky v závislosti na vyšších zástavbových hustotách, rychlejších procesech montáže i teplotních požadavcích, které musí splňovat teplotní profil. Pájecí pasty řadíme do skupiny viskózně-elastických kapalin, jejich chování je charakterizováno reologickými vlastnostmi, které jsou dány složením pasty. [6] [10]



Obr. 1: Složení pájecí pasty

Práškovitá pájka je dána velikostí a tvarem částic a typem pájecí slitiny. Poslední složka se podílí ve velké míře na kvalitě tisku, roztékání pasty, na smáčecích charakteristikách a definuje teplotu tavení. Nejčastějším tvarem částic jsou kulovité tvary. V objemu pájky je také zastoupeno 15% elipsoidů a 1% částic jiných tvarů. Velikost částic pájecí pasty se volí podle nejmenší apertury šablony. Používá se pravidlo 5D, které říká, že do nejmenší apertury šablony se má vejít 5 kuliček pájecí slitiny o největším průměru na výšku i na šířku. Další faktor, podle kterého volíme velikosti částic, je vzdálenost vývodů a nanášecí technika. Pájecí pasty se dělí dle normy ANSI J-STD-005 v Tab. 1. [6] [10]

Tab. 1: Rozdělení pájecích past dle ANSI J-STD-005

Typ	80% částic [μm]	Max 10% částic [μm]	Žádná větší než [μm]
1	150 – 75	menší než 20	160
2	75 – 45	menší než 20	80
3	45 – 25	menší než 20	50
Typ	90% částic [μm]	Max 10% částic [μm]	Žádná větší než [μm]
4	38 – 20	menší než 20	40
5	25 – 15	menší než 15	30
6	5 – 15	menší než 5	20

Typ 2 je vhodný pro nenáročné aplikace do rozteče vývodů součástek 0,65 mm. Typ 3 je určen pro ultra fine pitch aplikace s roztečemi vývodů součástek 0,4 - 0,3 mm. Typ 4 je rovněž určen pro ultra fine pitch aplikace s roztečemi vývodů pod 0,3 mm. [6] [10]

Kromě velikosti a tvaru částic se podílí na kvalitě pájeného spoje volba pájecí slitiny. Pájecí slitiny se používají pro různé hustoty zástavby montážních a propojovacích sestav

jednostranně nebo oboustranně pájených s různými typy pouzder. Při volbě pájecí slitiny se zaměřujeme na teploty liquidu a solidu, elektrickou a tepelnou vodivost, mechanickou pevnost, teplotní koeficient délkové roztažnosti (TCE), povrchové napětí slitiny hrající klíčovou roli při smáčivosti a pájitelnosti, kompatibilitu s povrchovými úpravami a složení pájecí slitiny, které je důležité s hlediska výběru prvků složení, protože od roku 2006 bylo olovo jako jeden z hlavních prvků složení pájecích slitin zařazeno mezi nebezpečné látky ohrožující životní prostředí. Základní typy pájecích slitin můžeme porovnat v tabulce Tab. 2. [6] [10]

Tab. 2: Základní typy pájecích slitin

Typ slitiny	Teplota solidu [°C]	Teplota liquidu [°C]
58Bi42Sn	138	138
62Sn36Pb2Ag	179	179
63Sn37Pb	183	183
SAC305	217	219
Sn100C	227	227

Další složku, kterou obsahuje pájecí pasta, tvoří tavidlo, které zajišťuje rychlejší smáčecí proces a tím vytváří spolehlivý spoj. Tavidla v pastovité formě se používají na bázi přírodní pryskyřice (**RO**), syntetické pryskyřice (**RE**) a organických kyselin (**OR**) s různou úrovní aktivace, která se pohybuje od nízké aktivace bez použití halogenidů označované **L0** přes aktivace s použitím halogenidů do 0,5% označované **L1**. Další jsou střední úrovně aktivace bez halogenidů (**M0**) a s použitím halogenidů 0,5 – 2 % (**M1**). Poslední je vysoká úroveň aktivace bez použití halogenidů (**H0**) a (**H1**). Součástí gelového tavidla je i rozpouštědlo podílející se na zasychavosti pasty. Gelové tavidlo je převážně složeno z 60 – 70 % pryskyřice a aktivátorů a 40 – 30 % rozpouštědla. Tavidlo ovlivňuje smáčecí charakteristiky, chování pasty při a po tisku a nakonec i kvalitu pájeného spoje. Tavidla by měla vykazovat konstantní a dobré smáčecí charakteristiky s malou závislostí na teplotě a času. [6] [10]

Poslední částí tvořící pájecí pastu jsou reologické modifikátory. Ty určují vlastnosti především v tečení a její deformaci vlivem tlaku při aplikaci pasty sítotiskem či přes šablonu. Reologické vlastnosti udávají chování pájecí pasty v dynamickém režimu, ale nezabývají se strukturálními a statickými vlastnostmi. Reologické chování pájecí pasty je dáno složením pájecí pasty, tvarem a velikostí částic, strukturou tavidlového pojiva i vzájemným fyzikálně chemickým působením mezi jednotlivými složkami pájecí pasty včetně smáčení i rozpouštění. Mezi nejdůležitější vlastnosti patří viskozita a tixotropnost. Dané vlastnosti ovlivníme reologickými modifikátory. Tím ovlivníme vlastnosti tisku pasty, smáčecí charakteristiky a v neposlední řadě také výslednou kvalitu pájeného spoje. Tixotropnost udává strukturní viskozitu, která popisuje změnu viskozity při působení smykového namáhání. [6] [10]

1.2 Tavidlové zbytky po pájení přetavením

Při výrobním procesu DPS vznikají na povrchu nečistoty, které se následně usazují a mohou ovlivnit spolehlivost výrobního procesu, pájecího procesu, pájených spojů a součástek. Nečistoty jsou dány kontaminujícími látkami a rezidui, které způsobují znečištění. Tyto látky můžeme rozdělit na dvě skupiny iontové a neiontové nečistoty. [17][18][19]

Neiontové nečistoty (zbytky) jsou nečastěji organického původu a vodivého charakteru. Vznikají při manipulaci s deskou ve výrobním procesu nejčastěji v těch částech

procesu, kde dochází k nanášení těchto organických materiálů na DPS (proces pájení, čištění). Mezi neiontové nečistoty řadíme: [17]

- Přírodní a umělé pryskyřice obsažené v tavidlech
- Tuky
- Oleje

Neiontové zbytky vedou ke vzniku nežádoucích impedancí, které ovlivňují izolační vlastnosti desky. Dále působí jako nežádoucí izolanty, které v kombinaci s iontovou kontaminací ovlivňují pájitelnost plošek, přilnavost pájecí masky, fyzickou interferenci s pohyblivými částmi a zapouzdření. Neiontové zbytky sice ovlivňují spolehlivost desky, ale nejsou tak nebezpečnými činiteli vedoucí k degradaci či ke zničení. [17]

Iontové nečistoty (zbytky) vysoce agresivní zbytky, které mohou zapříčinit vady na DPS a to trvalého nebo dočasného charakteru nebo selhání systému. Na deskách se vyskytují ve větší koncentraci a častěji než naopak neiontové kontaminace. Iontové nečistoty jsou tvořeny atomy a molekulami, které jsou vodivého charakteru. Mezi iontové nečistoty se řadí: [17]

- Pokovovací chemie
- Tavidlové aktivátory
- Pocení
- Iontové tenzidy
- Ethanolaminy

Ionty nejvíce ovlivňují korozi, dendritický růst a absorpci vody a mohou zapříčinit i úplné selhání. Ionty nejčastěji tvoří halogenidy (fluoridy [F-], chloridy [Cl-], bromidy [Br-]), dusičnany (NO_3^-), dusitany (NO_2^-), fosfáty (PO_4^-), sulfáty (SO_4^{2-}), alkalické ionty (K^+ , Na^+) a slabé organické kyseliny (WOAs). Při působení vlhkosti dochází k rozdělení částic na pozitivně a negativně nabitě, což zvyšuje celkovou vodivost roztoku. Tohoto jevu využívá elektromigrace podrobněji v kapitole 1.2.2. Z důvodu zhoršení spolehlivosti DPS vlivem iontových nečistot je potřeba provádět jejich měření a zjišťovat, jak působí. Nejčastějšími metodami měření je metoda ROSE nebo SEC (metoda vodního výluhu) a měření SIR vysvětlené v kapitole 3. [17]

Zbytky tavidel jsou jedním z nejčastějších škodlivých iontových zbytků, které znečišťují pájené i nepájené části DPS. Po pájecím procesu zůstávají na DPS, což je způsobeno malou aktivitou aktivátorů tavidla. Malá aktivita má za následek neúplné zreagování aktivátoru a tavidlového nosiče. Tím nemůže dojít k vytěkání z povrchu DPS. Od toho se odvíjí hlavní příčina tvorby tavidlových zbytků, to jest nesprávně nastavený pájecí profil nebo nesprávná volba tavidla do daného pájecího procesu. Vznik zbytků může probíhat na celém prostoru DPS, to znamená, že se může vytvořit na vodivých obrazcích i nevodivých plochách. Nejhorším případem je vytvoření pod pouzdry součástek, odkud se dodatečně hůře odstraňují. Škodlivost tavidlových zbytků je určena druhem tavidla, které můžeme rozdělit na



Obr. 2: Tavidlový zbytek [18]

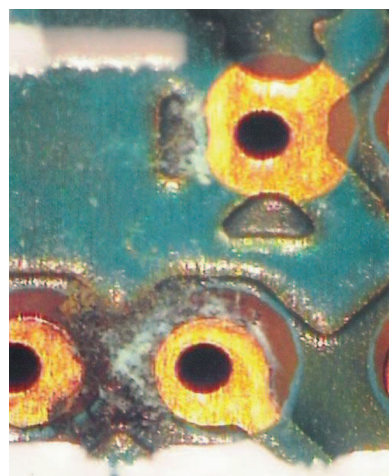
oplachová a bezoplachová. Bezoplachová (no-clean) tavidla nemají nic společného s myšlenkou, že nevytvářejí zbytky a nemusí se čistit. Rozdíl je ve tvorbě zbytků. Na rozdíl od oplachových tavidel vytvářejí méně zbytků, které jsou méně škodlivé a nemusejí se čistit v závislosti na jejich agresivitě a škodlivých účincích na DPS. [17][18][19]

Při vzniku zbytků tavidel v pájecím procesu dochází k chemickým reakcím mezi tavidlem a atmosférou, které vedou ke změně složení zbytků. Těmito reakcemi jsou polymerizace, izomerizace a oxidace. Při polymerizaci dochází ke spojování stejných monomerů nebo polymerů do větších molekul, což má za následek vytváření zbytků. Izomerizace je proces, při kterém dochází k transformaci jedné látky ve druhou, jejichž složení je stejné, ale s jinou strukturou. Při tomto procesu dochází k vytváření zbytků s unikátními parametry rozpustností, které se obtížně čistí rozpouštědly. Poslední reakcí je oxidace, která probíhá při expozici tavidla na vzduchu. Dvojně vazby obsažené v tavidle oxidují a vytvářejí peroxidy, hydroxidy a jiné, což se projeví menší rozpustností v rozpouštědle. Typický příklad tavidlových zbytků je na Obr. 2. [10]

Tavidlové zbytky mají vodivý charakter. Absorpce vody a teplota jsou hlavní činitelé, kteří ovlivňují jejich vodivost. S tím úzce souvisí závislost na vlhkosti. Koeficient absorpce vlhkosti a teplota mají vliv na korozi a elektromigraci. Při působení vlhkosti se zvyšuje vodivost zbytků, která může způsobit korozi, dendritický růst a elektromigraci. Všechny tři jevy se podílejí na možném úplném selhání DPS. Působení koroze vlivem tavidlových zbytků vidíme na Obr. 3. Vznik zkratu, jehož příčinou je dendritický růst a elektromigrace je na Obr. 4. [17][18][19]

1.2.1 Koroze

Kovové prvky, ze kterých jsou desky vytvářeny, v hlavní míře zastoupené mědi mají jednu neblahou vlastnost, která vlivem prostředí a jiných činitelů mění strukturu kovu. Vlastnost nazýváme korozi. Koroze je charakterizována jako "destruktivní útok způsobený chemickou nebo elektrochemickou reakcí kovu s různými prvky v různých prostředích". Mezi tyto prostředí řadíme vodní a plynné prostředí, které vykazují přítomnost prvků a sloučenin, jako jsou chlór, čpavek, oxidy dusíku, oxidy síry a sirovodík, vytvářející nebo podporující korozi. Korozní jev vede k vytváření iontů, které působí vyvolání jevu elektromigrace 1.2.2, měnící strukturu materiálu a rozložení kovu na jednotlivé oxidy, hydroxidy za pomoci působení vlhkosti. Koroze na jednotlivé holé vodiče působí odlišným způsobem v závislosti na podmínkách jejího vytvoření. Jedním z faktorů ovlivňujících korozi jsou tavidlové zbytky, které při procesu vzniku absorbují látky z okolního prostředí, ať už vodního nebo plynného skupenství. Jestliže jsou zbytky přítomny na vodivé cestě, podílejí se s pomocí korozivních činitelů na korozi spojů, proto je nutné zajišťovat kvalitní čištění, aby k tomuto jevu nedocházelo. [17][18][19]



Obr. 3: Působení koroze vlivem tavidlových zbytků [18]

Galvanická koroze

Je speciálním druhem koroze, který probíhá u složitějšího systému s více než jedním kovem. Podstatou galvanické koroze je přítomnost 2 a více kovů v systému, které mají

zajištěnou elektrickou vazbu. Tento druh koroze je mnohem méně nebezpečný, neboť ušlechtilější kov zpomaluje korozi méně ušlechtilějšího kovu, který je ke korozi více náchylný. Výsledkem je snížení korozivních účinků na systém. Průchod koroze některých kovů určuje standardní elektrodový potenciál. **Tab. 3** uvádí standardní elektrodový potenciál pro kovy používané v elektronických pouzdrech. Čím je pozitivnější potenciál, tím je kov ušlechtilější, a tudíž je méně náchylný ke korozi. Z tabulky je patrné, že měď, která je nejpoužívanější materiál na výrobu DPS, má dobrou odolnost vůči korozi. [17][18][19]

Tab. 3: Standardní elektrodový potenciál elektrotechnických kovů

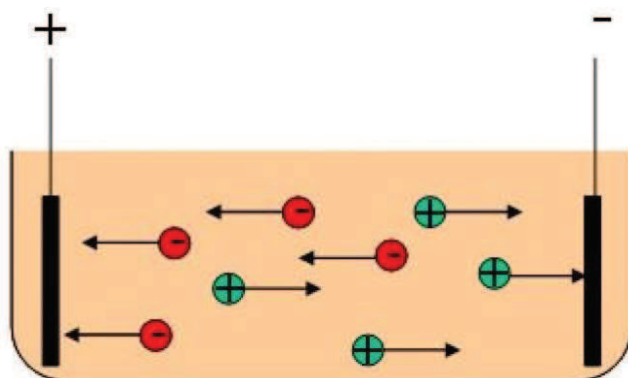
Kov	Kovový iont	Elektrodový potenciál při teplotě 25 °C [V]
Zlato	Au^{3+}	1.498
Palladium	Pd^{2+}	0.987
Stříbro	Ag^+	0.799
Měď	Cu^{2+}	0.337
	Cu^+	0.521
Olovo	Pb^{2+}	-0.126
Cín	Sn^{2+}	-0.136
Nikl	Ni^{2+}	-0.250
Železo	Fe^{2+}	-0.440
	Fe^{3+}	0.331
Chrom	Cr^{3+}	-0.744
Hliník	Al^{3+}	-1.662

1.2.2 Elektromigrace

Elektromigrace je jev, při kterém dochází k migraci hmoty ve vodě s tavidlovými zbytky vlivem přiloženého elektrického pole. Vzniklé elektrické pole přenáší ionty tvořené hmotou materiálem, ve kterém k elektromigraci dochází. U jevu platí protikladná přitažlivost, neboť záporné ionty putují ke kladné elektrodě a kladné ionty k záporné elektrodě, to je vidět na Obr. 5. Materiály, u kterých se uplatňuje jev elektromigrace, se nazývají **elektrolyty**. Migrace snižuje izolační mezery, což v konečném důsledku může vést k elektrickému zkratu. Míra elektromigrace roste s teplotou. [7] [15][17][18][19]



Obr. 4: Vznik zkratu vlivem elektromigrace [18]



Obr. 5: Schematické zobrazení jevu elektromigrace [15]

Z elektrotechnického hlediska jsou elektrolyty vodiče druhého řádu. Přenos elektrického náboje je zde zprostředkován přenosem elektricky nabitých částic, které jsou nesený ve směru nebo proti směru elektrického pole, v závislosti na náboji iontů. Potom můžeme celkové množství látky vyjádřit rovnicí [7]:

$$n = Q / (z * F) \quad (2)$$

kde n – látkové množství [mol], Q - elektrický náboj [C], z – počet vyměněných elektronů [-], F – Faradayův náboj [C / mol]

Při přenosu částic dochází k vedení elektrického proudu přes elektrolyt. Tento proud je nežádoucí, jestliže materiál sloužící jako elektrolyt má charakter izolačního oddělení dvou míst s různými potenciály, fungujícími jako elektrody. Velikost tohoto proudu je dána vztahem [7]:

$$J = (U - E_{j,A} + E_{j,K}) / (L * r) \quad (3)$$

kde J – proudová hustota [A / m²], U – přiložené napětí [V], $E_{j,A}$ – přepětí anody [V], $E_{j,K}$ – přepětí katody [V], L – vzdálenost elektrod [m], r - měrný odpor elektrolytu [W * m]

Převrácenou hodnotou měrného odporu elektrolytu je měrná vodivost elektrolytu. Pokud je počet elektroaktivních látek v elektrolytu k , je tato vodivost vyjádřena [7]:

$$\sigma = F * \sum_{i=1}^K c_i * u_i * z_i \quad (4)$$

kde F – Faradayův náboj [C / mol], s - měrná vodivost [S/m], c_i – molární koncentrace iontů i – té složky v roztoku [mol / m³], u_i – pohyblivost iontů i – té složky [m² * V⁻¹ * s⁻¹], z_i – počet vyměněných elektronů u iontů pro i – tou složku [-]

Elektromigrace má za následek vedení elektrického proudu a změnu rozložení částic v elektrolytu. Elektromigraci je vhodné klasifikovat a kvantifikovat, z důvodu vlivu na vlastnosti tavidlových zbytků, pomocí vhodných měřících metod jako je měření povrchového izolačního odporu více v kapitole 3.1. [7]

1.3 Čištění tavidlových zbytků

Odstraňování tavidlových zbytků není jednoduchou záležitostí. Pro čištění DPS od zbytků tavidla je možno v závislosti na čištěném materiálu použít 2 metody odstraňování.

První metodou je mechanické čištění, které probíhá na bázi kartáčování. Metoda je vhodná pro čištění DPS s malou zástavbou součástek a velkými průměry spojů, kde nedojde k mechanickému poškození součástek ani povrchu desky a jednotlivých spojů. [5]

Druhou metodou je chemické čištění, které se děje pomocí rozpouštědel, které jsou na bázi vody nebo organických rozpouštědel. Při chemickém čištění musíme dbát na volbu rozpouštědla a metody čištění, protože při špatné volbě může dojít k poškození DPS. Faktory ukazující vhodnost použití rozpouštědla jsou [10]:

- **čistící účinnost** na různé typy tavidel, lepidel i pájecích past
- **kompatibilita s různými povrchy** DPS , součástek, tiskových šablon i konstrukčních plastů

- **technika čištění** (ponor, sprej, ultrazvuk)
- **znalost podmínek čištění** (teplota a doba čištění)
- **schopnost pronikat (penetrovat) pod součástky SMD** (ovlivňuje ji povrchové napětí, viskozita a smáčivost)
- **toxicita** - nejenom negativní vliv na lidský organismus, ale také možný nepříznivý vliv na životní prostředí
- **spotřeba, cena**

Nejvíce se užívá k odstraňování tavidlových zbytků vodní čištění s různými druhy příměsí v roztoku jako jsou saponifikátory, alkoholy a jiné příměsi. Další roztoky, či čistící kapaliny mohou být na bázi fluorovaných a perfluorovaných uhlovodíků, terpenů, alkoholů.
[10]

2 Pájení přetavením

V současném trendu výroby DPS má technologie pájení přetavením označovaná anglickým výrazem reflow soldering nebo zkráceně reflow nepostradatelnou roli. Pájení přetavením je úplně odlišná metoda pájení od všech ostatních technologií pájení. Od ostatních pájecích procesů se liší v použití pájecích past. V ostatních pájecích procesech se využívá nanášení pájky a tavidla na rozehřáté vývody a pájecí plošky. U reflow se na plošky DPS nanese pájecí pasta více v kap. 1.1 a do ní se osadí součástky. Osazená DPS prochází přetavovací pecí, ve které dochází k přetavení při teplotě vyšší, než je teplota tání pájky obsažené v pájecí pastě. Součástky jsou pomocí povrchového napětí automaticky vycentrovány na dané plošky a připájeny. Technologie reflow je vhodná pro osazování čistou povrchovou montáží jednostrannou nebo oboustrannou a některými druhy kombinované povrchové montáže. [10]

Pájení reflow je v přetavovací peci realizováno pomocí přenosu tepla. Při pájení musí být zajištěn dostatečný přísun tepla na DPS a malé ztráty, aby byl zajištěn kvalitní proces. V dnešní době se využívají při procesu reflow všechny druhy přenosu tepla, od kterých se odvíjejí pájecí metody. Tab. 4 ukazuje obecné srovnání hlavních vlastností pájecí systémů. [10]

- Vedení
- Proudění
- Záření

2.1 Metody pájení přetavením

- konvenční pájení (pájení horkým vzduchem nebo plynem)
- infraohřev (pájení infračerveným zářením)
- kondenzační metoda (pájení v kondenzovaných parách)
- metoda pájení laserem
- kontaktní metody

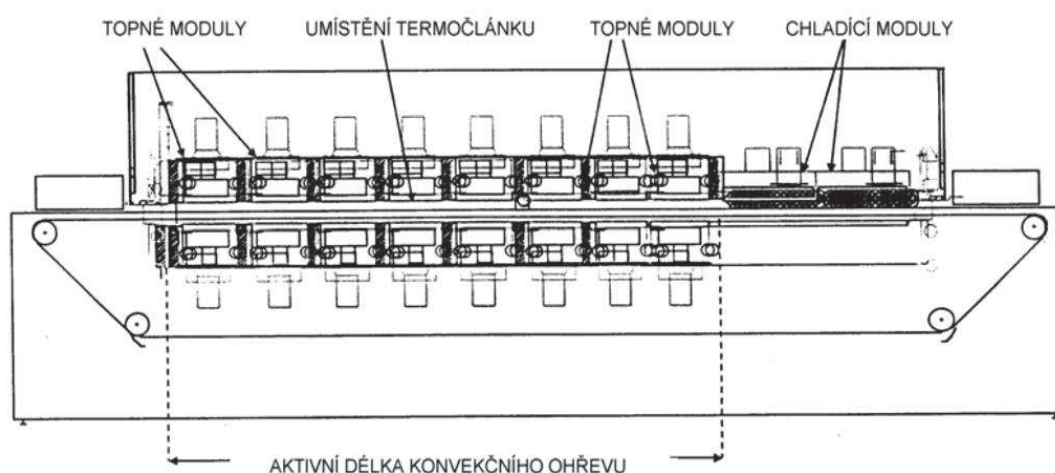
Tab. 4: Srovnání tří nejdůležitějších metod pájení přetavením

<i>Faktor / Metoda pájení přetavením</i>	<i>Infraohřev</i>	<i>Kondenzace</i>	<i>Konvekce</i>
Řízení procesu	dobré	výborné	Velmi dobré
Pracovní teplota	regulovatelná	pevná	regulovatelná
Homogenita pracovní teploty	špatná	velmi dobrá	dobrá
Maximální teplota	špatně definovatelná	pevná	špatně definovatelná
Univerzálnost	ucházející	velmi dobrá	dobrá
Citlivost na barvu materiálu	velká	žádná	malá

2.1.1 Konvekční pájení

Konvekční pájení je realizovatelné pomocí nenucené i nucené konvekce. Ve výrobě se preferuje nucená konvekce, aby bylo možné řídit dostatečný přísun tepla na DPS. K tomu se využívá soustava ventilátorů a topení. Konvekční pec, která je na Obr. 6, využívá primárního zdroje tepla, který je realizován topnými články, k získání dostatečné energie pro přetavení pasty. Teplo od zdroje se získává z ohřátého plynu na bázi vzduchu, dusíku nebo vodíku

pomocí soustavy ventilátorů pájecím prostorem po jedné nebo obou stranách montážní a propojovací sestavy. Konvekční pece jsou složeny ze čtyř nezávisle regulovatelných teplotních zón a pohyblivého prstového nebo pásového dopravníku. Pohyblivý dopravník zajišťuje pohyb DPS v peci jednotlivými teplotními zónami. Množství tepla můžeme ovlivnit změnou rozdílu teplot a koeficientem konvekčního přenosu tepla. Koeficient konvekčního přenosu tepla nebo jinak nazývaný konvektivní součinitel je dán rychlostí, směrem a průtokem proudění. Schopnost plynů přenášet teplo je omezena jejich nízkým měrným teplem, proto konvekční systémy vyžadují vysoký průtok plynu. Aby systém dosáhl efektivního využití plynu, jsou pece konstruovány s cirkulací, tak dochází ke snižování ztrát plynu. V závislosti na konstrukci konvekčního systému bude pocházet kolem 10 – 25% plynu z externího přísunu, zbytek bude tvořit recirkulovaný plyn systému. [1][10]



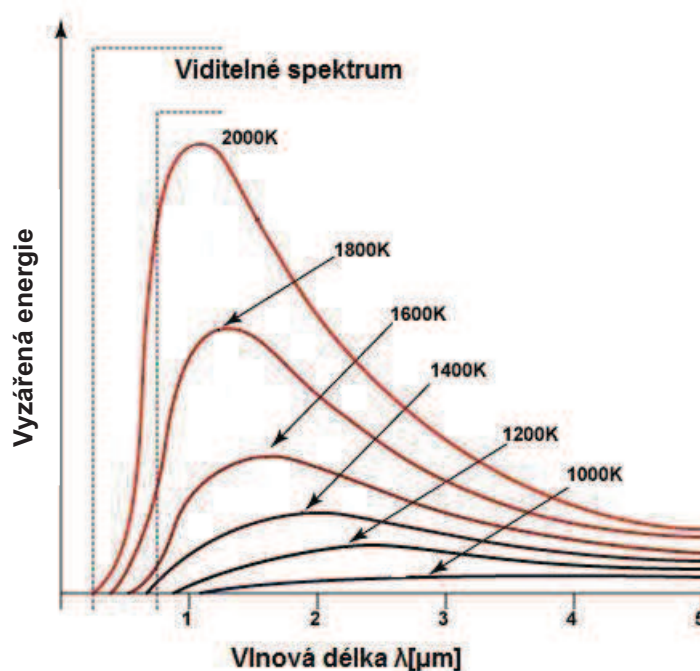
Obr. 6 Schéma konvekční reflow pece [10]

2.1.2 Pájení infračerveným zářením

Každá látka emituje elektromagnetické záření, pokud nemá teplotu absolutní nuly [1]. Se zvyšující se teplotou exponenciálně na čtvrtou roste vyzářená energie a tím i přenos tepla to je patrné na obrázku Obr. 7. [1][10]

Jestliže umístíme dvě tělesa, tak aby záření z jednoho tělesa bylo přijímáno tělesem druhým, pak těleso s nižší teplotou bude přijímat více energie, než vyzáří a jeho teplota bude stoupat. Energie zářiče, jež je částí elektromagnetického spektra, nepotřebuje ke svému šíření žádné médium. Nejčastěji k tomu dochází mezi pevnými plochami. [1][10]

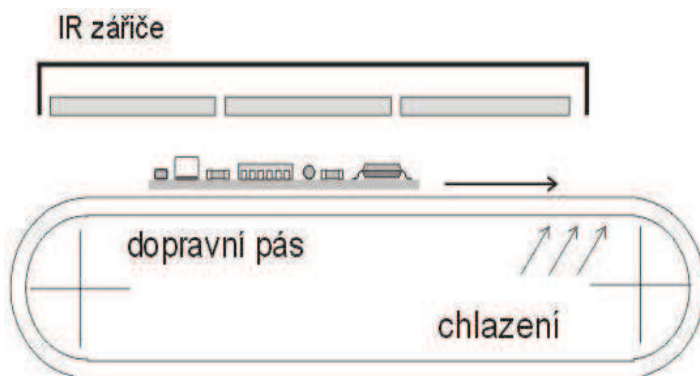
Pro pájení infraohřevem je charakteristické použití IR zářičů,



Obr. 7: Závislost energie na spektru IR zářiče [17]

kteře vyprodukují energii potřebnou k přetavení pájecí pasty na montážním celku. Množství tepla, které je absorbováno, záleží na koeficientu, jehož velikost souvisí s barvou povrchu a vlnovou délkou záření. Obecně můžeme říct, že absorpce záření ze vzrůstající vlnovou délkou klesá. Při infraohřevu dochází k nerovnoměrnému rozložení teploty na povrch DPS z důvodu charakteristického jevu vznikajícího při tomto druhu pájení. Součástky s tmavší barvou jsou více zahřívány než světlý povrch DPS nebo místa s pájecí pastou, což má vliv na tepelné namáhání součástek a tím kvalitu pájecího procesu. [1][10]

Na pájecí proces se využívají nejčastěji průběžné infračervené pece, které jsou vybaveny pásovým dopravníkem. IR zářiče jsou komponovány nad i pod dopravník, to znamená, že DPS umístěna na dopravník, je ozařována z obou stran, což je možno uplatnit při pájení kombinované povrchové montáže. Soustava zářičů je v peci rozložena v jednotlivých zónách zajišťující charakteristický teplotní profil podobně jako soustava konvenčních modulů v konvenční peci. Teplotní profil je nastavován mikroprocesorovým systémem, který řídí nastavení rychlosti dopravníku a velikosti teplot v jednotlivých zónách. Jednoduché schéma pece infraohřevu můžeme vidět na Obr. 8. Pro další aplikace např.: vytvrzování lepidla jsou pece doplněny o UV modul. Jako IR zářiče se nejčastěji používají wolframové zářiče. [1][10]



Obr. 8: Model přetavovací pece s infraohřevem [16]

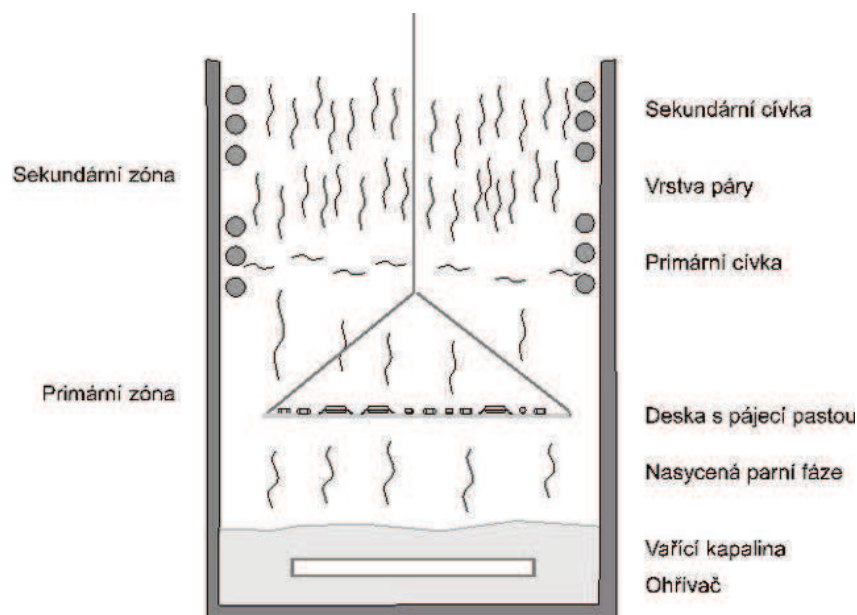
2.1.3 Kondenzační pájení (pájení v párách)

Pájení v párách pracuje na principu zahřívání kapaliny na bod varu a následnému odpaření. DPS se součástkami osazenými v pájecí pastě se předeheje a poté se vloží do zóny odpařování. Pára kondenzuje na chladných plochách DPS, součástek a jejich vývodů. Při kondenzaci dochází k uvolňování latentního tepla, které má za následek přenos par, které způsobují zahřívání desky a součástek až na teplotu zajišťující přetavení pájecí pasty. Dochází k vytvoření pájeného spoje. Dále se musí zabránit úniku par ze stroje, to je provedeno překrytím primární parní zóny sekundární parní zónou. K pájení v párách se využívají dva druhy tekutin: [1][10]

- fluorouhlíky
- perfluoropolyétery

Fluorouhlíky obsahují uhlík a fluor, jejich teploty varu se pohybují v rozmezí 220 – 235 °C nebo 250 – 265 °C a body varu mají 215 °C nebo 250 °C. Perfluoropolyétery se skládají z uhlíku, fluoru a kyslíku a mají bod varu 260 °C. [6]

Pájecí teplota je dána bodem varu kapaliny, což zaručuje konstantní teplotu. Kondenzační pájení, které vidíme na Obr. 9, je rovnovážný proces, protože rozložení teploty v celém systému je stejné. Nasycená pára neobsahuje kyslík, takže nedochází k oxidaci pájených míst. [1][10]



Obr. 9: Pájení v párách [16]

2.2 Teplotní profil v reflow peci

Teplotní profil zajišťuje ověření kvalitních pájecích vlastností pece, které musí být provedeno před pájením DPS. Pro správné nastavení pece se měří dva typy profilů:

- Podélný teplotní profil – udává teplotní závislost na čase měřenou na montážním celku při průchodu pecí. Měření se používá při optimalizaci procesu nových typů DPS. [10]
- Příčný teplotní profil – „charakterizuje nehomogenitu přetavovacího tunelu v příčném směru během pájecího procesu. Je dán konstrukcí pece a je ovlivněn zástavbovou hustotou DPS. Profil je nutno sledovat při náročnějších aplikacích a odpovídajícím způsobem volit orientaci montážního celku při průchodu.“¹ [10]

Každá reflow pec obsahuje 4 teplotní oblasti, ve kterých probíhá daný druh procesu.

- 1. Oblast – předehřev (pre-heating zone)
- 2. Oblast – oblast vyrovnávání teploty, aktivace (soaking zone)
- 3. Oblast – přetavení pasty (reflow zone)
- 4. Oblast – chlazení (cooling zone)

V zóně 1 a 2 dochází k odpaření rozpouštědla, aktivaci tavidla a předehřevu součástek a substrátu. K přetavení samotné pájecí pasty a vytvoření pájeného spoje dochází ve třetí zóně, když teplota dosahuje nejvyšších hodnot. V poslední zóně dochází ke chlazení zapájené DPS. Ideální teplotní profil, je založen na třech faktorech: maximální teplotě, prodlevě nad teplotou liquidu, nárůstem teploty. [10]

Maximální teplota (Peak Temperature) – nejvyšší bod teplotního profilu udávající maximální povolenou teplotu. Pokud se překročí povolené teploty a deska se příliš zahřeje,

¹ Starý, J. *Montážní a propojovací technologie*, strana 173

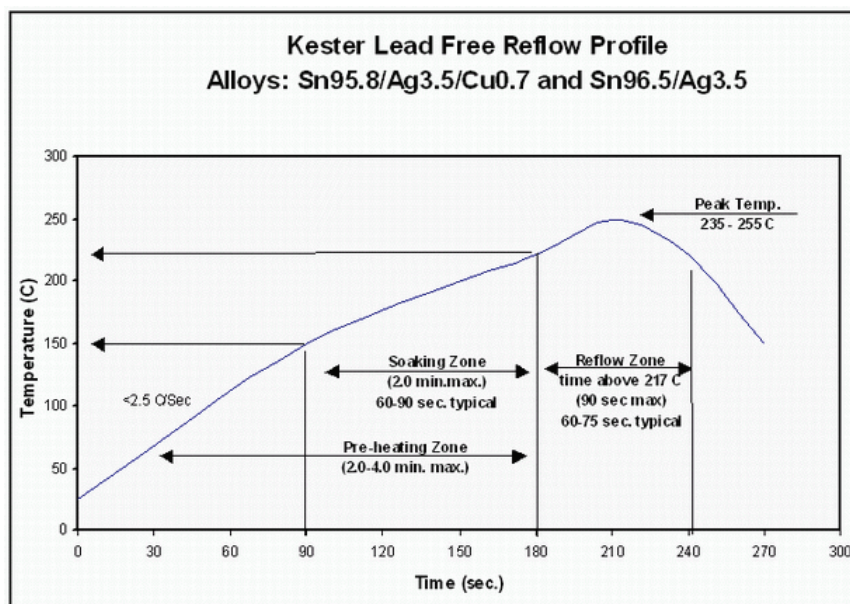
dochází ke hnědnutí okrajů desky a může dojít k poškození součástek. Pokud je maximální teplota nízká nedojde k dostatečnému přetavení pájecí pasty. [10]

Čas nad liquidem – je to časový úsek ohraničující přetavovací zónu. Čas nad liquidem udává časový úsek, ve kterém by nemělo dojít k zákmitům teploty v peci. Teplota pájení by měla být o 15 – 40 °C vyšší než teplota liquidu. [10]

Nárůst teploty v předeheřvu – velice důležitá vlastnost, která udává gradient nárůstu teploty. Při pomalé rychlosti nárůstu teploty převažuje efekt odpařování rozpouštědla a je i vyšší viskozita pasty oproti rychlému nárůstu teploty, kdy dominuje efekt teplotní vibrace molekul. Jestliže je rychlost nárůstu teploty větší, než je předepsáno, rozpouštědla nestačí prodifundovat přes vrstvu pasty a dochází k „erupcím pájecí pasty“. [10]

Poklešť teploty v oblasti chlazení – velice důležitá vlastnost, která udává gradient chlazení. Při chlazení se doporučuje rychlost sestupu 4 Ks^{-1} , aby došlo k vytvoření jemnozrnné struktury a byla minimalizována tloušťka intermetalických vrstev a křehkost spoje. [10]

Všechny parametry ovlivňující pájecí profil se nastavují pro každý typ pájecí pasty odlišně, to je dáno rozdílnými parametry pájecích past, které udává výrobce pasty. Pomocí technického listu od výrobce se nastavuje doporučený profil, jestliže při zkoušce obstojí, může se provést pájecí proces. V opačném případě se provádí změna nastavení parametrů pece. Zkouška se provádí pomocí zkušební desky, na kterou jsou připevněny termočlánky, které zkoumají hladiny teplot jednotlivých zón v peci. Termočlánky jsou připojené k vyhodnocovacímu zařízení, které zaznamenává graficky průběh teploty, tím vzniká ověřovací teplotní profil.



Obr. 10: Teplotní profil pájecí pasty SAC 305 od firmy Kester [13]

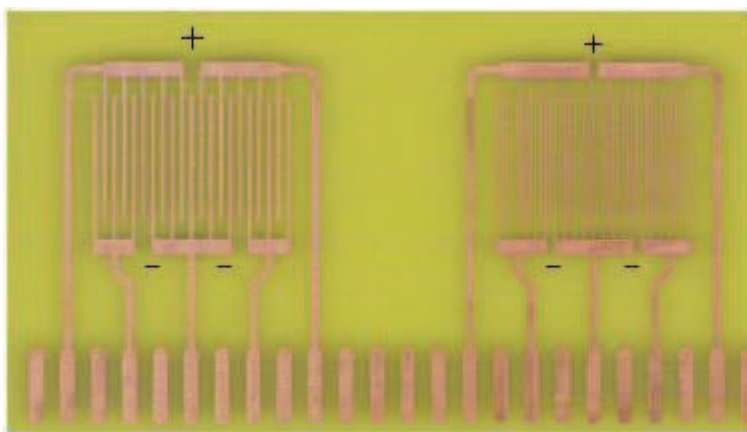
Ukázkový profil, který vidíme na Obr. 10, říká, že maximální teplota v peci bude mezi 235 – 255 °C s časem nad liquidem do 90 s. Gradient nárůstu teploty bude <2.5 °C.

3 Metodika zkoušek

3.1 Měření povrchového izolačního odporu metodou SIR

Povrchový izolační odpor je důležitou vlastností DPS, protože udává izolační odolnost povrchu. Z hlediska kvalitního procesu pájení je tato vlastnost důležitá. Říká nám, jestli je povrch desky bez defektů, které bývají způsobeny zbytky tavidel po pájení. [7]

Hlavní vlivy, které se projevují na povrchové vodivosti, jsou relativní vlhkost prostředí, schopnost vázat či odpuzovat vodu a čistota povrchu materiálu. Z toho vyplývá, že drsnější povrchy mají sklon zachytávat více nečistot, které mají za následek snižování povrchového izolačního odporu. Tato vlastnost se výrazně projevuje u smáčivých povrchů, naopak na nesmáčivých povrchy to má relativně malý vliv. [7]



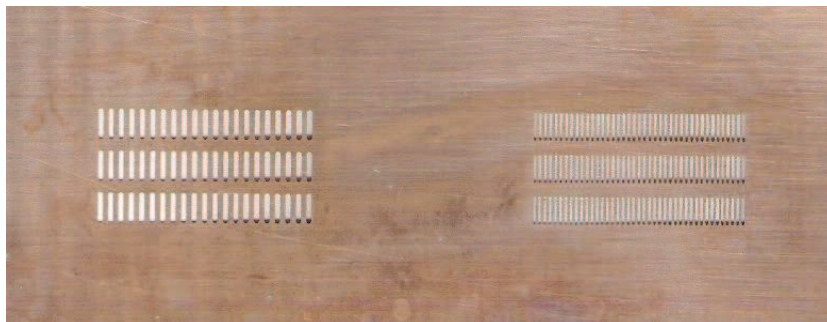
Obr. 11: Testovací obrazce dle IPC-B-25

„Samotné zkoumání povrchového izolačního odporu je nedestruktivní metoda, která se využívá k vývoji materiálů pro elektroniku a optimalizaci výrobních procesů, a způsobu stanovení spolehlivosti.“ [7]²

Cílem testování SIR je odhalení nebezpečných sklonů ke vzniku elektrochemických poruchových mechanismů, jimiž mohou být neakceptovatelné svody způsobené vlhkostí, korozivitou a přenosem kovů, k nimž může na hotových zařízeních docházet. Poruchové mechanismy vznikají vlivem vlhkosti, ionických residuí a elektrického potenciálu. [7]

SIR testování charakterizuje odolnost materiálu vůči vytvoření zkratu, určuje korozivní účinky tavidel a použití čisticích prostředků. K měření se používají testovací obrazce dle IPC-B-25 na Obr. 11.

Podle navrženého testovacího vzorku byla navržena šablona pro tisk pájecí pasty pro první dva hřebeny s rozměry 0.5×3 mm a $0,25 \times 3$ mm. Hotovou šablonu máme na Obr. 12.



Obr. 12: Šablona pro tisk pájecí pasty na zkušební testery

² Pulec, J; Analýza vlivu pouzdření na izolační vlastnosti, str.: 40

Testování povrchového izolačního odporu se provádí pro různé podmínky odlišných prostředí na DPS podle normy IPC–TM–650 2.6.3.6.:

Nejprve se stanovuje základní hodnota povrchového izolačního odporu, která se získá měřením odporu mezi jednotlivými piny obrazce. Testovací vzorek se připojí ke zdroji stejnosměrného napětí o hodnotě 100 nebo 500V podle vyznačených pólů, které jsou na obr. 18. Samotné měření se provádí ohmmetrem mezi póly. Při každém měření se nechá 60 sekund hodnota stabilizovat. Měření se provádí minimálně čtyřikrát kombinací všech možností pólů. [12]

Dále norma uvádí testovací podmínky pro vlhkostní test a elektromigrační test. Jelikož vlhkost a elektromigrace jsou všudypřítomní nežádoucí činitelé působící na izolační odpor.

Při vlhkostním testu se testovací vzorky umísťují do klimatické komory. Vzorky se ukládají do komory ve svislé poloze s rozestupy minimálně 1,25 cm. V komoře se vzorky nechávají stárnout po dobu 24 hodin při teplotě $35^{\circ} \pm 2^{\circ} \text{C}$ a při relativní vlhkosti $88\% \pm 5\%$. Hodnoty izolačního odporu se stanoví stejně jako základní hodnota. [12]

Elektromigrační test se obdobně jako vlhkostní test provádí v klimatické komoře s obdobnými rozestupy. U vzorků se propojí všechny piny se stejným pólem a připojí se na zdroj stejnosměrného napětí 20, 45, 48 nebo 50V. Vzorky se nechají stárnout 24, 72, 96 nebo 168 hodin při teplotě 35 nebo 85°C a při relativní vlhkosti 85 %. Při testu se pozoruje dendritický růst, který může zapříčinit vlivem elektromigrace zkrat. Po uplynutí doby stárnutí se vzorky opět proměřují jako u základní hodnoty. [12]

3.2 Měření změny kapacity a ztrátového činitele na změně frekvence

Při měření kapacity a ztrátového činitele si musíme zavést pojem relativní permitivita ϵ' (-). Je to dielektrická konstanta charakterizující vlastnosti dielektrika. Permitivita udává informace o složitých mikroskopických dějích, které se odehrávají v látce vložené do elektrického pole. Tyto děje nazýváme dielektrická polarizace. Ta vzniká, jestliže se elektricky vázané náboje začnou pohybovat ze svých rovnovážných poloh na jiné polohy v krátké vzdálenosti nebo obsahuje-li látka dipólové molekuly, orientují se ve směru pole vlivem působení elektrického pole. Možnou příčinou vzniku polarizace mohou zřídka být i volné náboje. Dalším faktorem vyjadřující míru polarizace je vektor polarizace P (Cm^{-2}). S polarizací úzce souvisí polarizovatelnost (α), která charakterizuje schopnost látky polarizace. [2][3]

V dielektriku se současně vyskytuje hned několik druhů polarizací, které se překrývají. Obecně je dělíme na [2][3]:

- Pružné polarizace
- Relaxační polarizace
- Zvláštní polarizace

Pružné polarizace se vyznačují rychlým průběhem beze ztrát energie bez závislosti na kmitočtovém pásmu. Relaxační polarizace jsou dány pomalým nárůstem a pomalým ubýváním při vložení a odpojení elektrického pole. Zvláštní polarizace se chovají jiným způsobem než polarizace předchozí. [2][3]

Při vložení dielektrika do elektrického pole s konstantní intenzitou E (Vm^{-1}) se zvětší elektrická indukce D (Cm^{-2}) o vektor polarizace P . Polarizační jevy lépe vystihuje relativní permitivita, která je konstantou úměrnosti mezi intenzitou elektrického pole a elektrickou indukcí. [2][3] Tuto závislost popisuje vztah [3]:

$$D = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot E \quad (5)$$

kde ε_0 je permitivita vakua ($\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$) a ε_r je relativní permitivita (-).

Zvýšením elektrické indukce při konstantní intenzitě el. pole vlivem polarizace dochází ke zvýšení náboje mezi elektrodami dielektrika. Proto se při měření permitivity využívá měření kapacity, jejichž převodní vztah je [3]:

$$\varepsilon_r = \frac{C_x}{C_0} \quad (6)$$

kde C_x charakterizuje kapacitu kondenzátoru s vloženým dielektrikem a C_0 vyjadřuje geometricky shodný měřicí systém s vakuovým dielektrikem.

Hodnota relativní permitivity vakua je rovna jedné, neboť ve vakuu nedochází k polarizaci. Všechny ostatní elektroizolační látky mají hodnotu větší než jedna. Relativní permitivita není materiálovou konstantou, protože je teplotně, frekvenčně a napětově závislá, proto se vždy uvádí podmínky, při kterých se určuje. [2][3]

Každé reálné dielektrikum se vyznačuje nenulovou vodivostí a obsahuje nečistoty vlhkost, příměsi a jiné, které vytvářejí vznik nestacionárních dějů vedoucích ke ztrátám energie nazývaných dielektrické ztráty. Tyto ztráty způsobují přeměnu části energie el. pole na energii tepelnou. [2][3]

Celkové ztráty jsou dány součtem dílčích ztrát v dielektriku, které dělíme podle fyzikální podstaty na [2][3]:

- Vodivostní ztráty
- Polarizační ztráty
- Ionizační ztráty

Vodivostní ztráty se vyskytují u všech druhů dielektrik a jsou dány vnitřní a povrchovou vodivostí. Vznikají srážkami volných nosičů náboje s kmitajícími částicemi. [2][3]

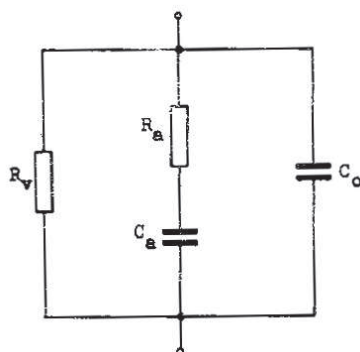
Polarizační ztráty mají největší míru zastoupení v součtu ztrát. Způsobují je polarizační mechanismy. Velikost ztrát a závislost na teplotě a kmitočtu určuje druh polarizačního mechanismu. [2][3]

Ionizační ztráty se vykytují u plyných a jiných dielektrik obsahující plynové částice. Vznikají při překročení prahu ionizace daného plynu. [2][3]

Mírou dielektrických ztrát je nejvíce používán ztrátový činitel $\text{tg } \delta$. Závisí na konduktivitě, teplotě a kmitočtu navíc na něj působí polarizační mechanismy. [2][3]

Fyzikální děje probíhající v izolantu lze modelovat pomocí různých náhradních schémat složených z ideálních prvků. Jednoduché náhradní schéma je uvedeno na Obr. 13, v

němž R_v odpovídá proudu i_v tekoucím izolantem v důsledku jeho vodivosti, sériový člen R_a , C_a představuje polarizační děje a kapacita C_0 odpovídá kapacitě geometrické. [2][3]

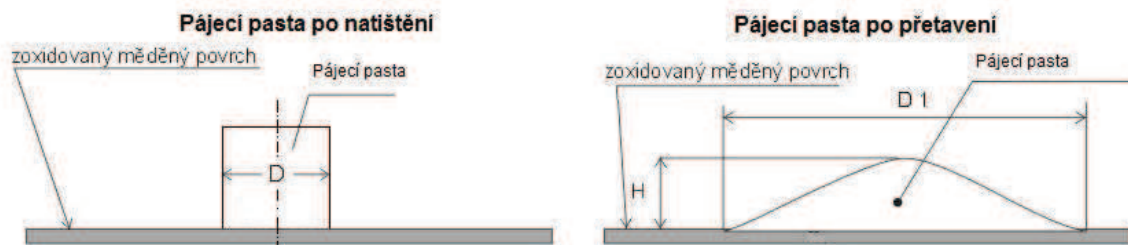


Obr. 13: Zjednodušené náhradní schéma kondenzátoru s technickým dielektrikem [3]

3.3 Měření roztékavosti pájecí pasty

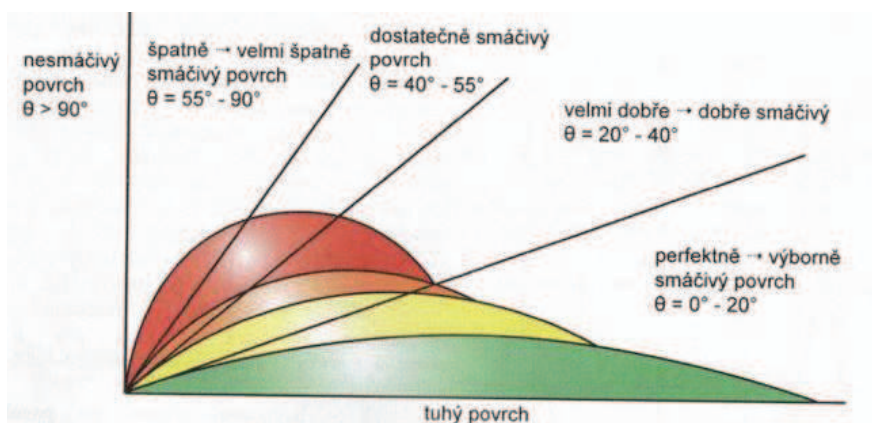
Tento test se používá k měření aktivity tavidla. Průběh testu je nejlépe srozumitelný z Obr. 14. Znamé množství pájecí pasty je umístěno na měděný povrch s regulovanou tloušťkou oxidace. [1]

Po změření množství aplikovaného tavidla se pájecí pasta přetaví. Rozsah, do kterého se pájka obsažená v pastě rozprostře, je funkcí aktivity tavidla. Když se během testu neodstraní oxidová vrstva, neproběhne smáčení a pájecí pasta zůstane v natisknutém stavu s délkou hrany D . Se zvýšením aktivity tavidla se odstraní zoxidovaná vrstva na měděném povrchu a dojde k roztečení pájecí slitiny, čím se sníží výška H . [1]



Obr. 14: Test roztékavosti

Na základě roztékavosti pasty je s hlediska kvality pájeného spoje nutné pozorovat smáčecí úhel, který je vidět na Obr. 15.



Obr. 15: Smáčecí úhel [12]

3.1 Měření ionizovatelných nečistot metodou ROSE a SEC

Nejrozšířenější metoda měření množství iontové kontaminace je metoda ROSE (Resistivity Of Solvent Extract) a SEC (Solvent Extract Conductivity). Metoda spočívá ve vyhodnocování změny odporu respektive vodivosti v systému. Při měření touto metodou se pozoruje pouze změna vodivosti. Metoda slouží k určení přesného množství kontaminovanými látkami, ale nerozlišuje přesný druh ionizovatelného znečištění. Pro stanovení druhu znečištění se používá iontová analýza DPS. Norma **IPC-TM-650 2.3.25** uvádí využití dynamické a statické metodu extrakce. [8]

V statické metodě se zkoumaný substrát vkládá do testovací nádrže. Součástí testovacího systému je kromě testovací nádrže také systém zajišťující řešení míchání a monitorovací zařízení na měření vodivosti. Do systému může být připojeno topení. [8]

Následuje kalibrace zařízení. Testovací nádrž se naplní roztokem izopropanolu a deionizované vody v poměru 75%/25% nebo 50%/50 % a přidá se definované množství chloridu sodného, který se používá pro vyhodnocování množství nečistot. Takových kalibračních roztoků si připravíme více pro různé definované množství chloridu sodného, abychom mohli, co nejpřesněji stanovit koncentraci znečištění. [8]

Testování probíhá v testovacím kanistru naplněným roztokem izopropanolu a deionizované vody v uvedeném poměru. Roztok se nechá promíchat, tím se vytlačuje oxid uhličitý, a může se začít měřit. Změří se vodivost roztoku po promíchání, poté se vzorek ponoří do nádrže. Doba ponoru je proměnná, ale minimální doba by měla být alespoň 10 minut za stálého promíchávání. Opět se změří vodivost v systému. Dalším krokem je kontaminace vzorků, které se znovu ponoří do nádrže a nechají se promíchat po stejnou dobu. Tím dochází k mechanickému uvolňování iontů. Po uplynutí minimální doby výluhu se změří vodivost v nádrži. [8]

Nakonec provedeme vyhodnocení, které spočívá v odečtení vodivosti a v závislosti na objemu roztoku a ploše vzorků vyhodnotíme množství nečistot na DPS a v pájecí pastě v $\mu\text{g NaCl cm}^{-2}$. Při měření vzorku nesmí dojít ke kontaktu ruky se vzorkem, neboť při dotyku se přidávají na substrát další nečistoty a dochází ke špatnému vyhodnocení výsledku. [8]

U dynamické metody je kalibrace shodná se statickou metodou. Rozdíl nastává při měření vodivosti. To probíhá průběžně, během celého času ponoru vzorků. Systém je uzavřen v cirkulační smyčce. V testovací nádrži se za stálého míchání uvolňují nečistoty, které jsou odsávány a následně prochází deionizací. Deionizovaný roztok se vrací do testovací nádrže. V průběhu testu nám vodivost vzroste na počátku při plné kontaminaci a poté klesá až na základní úroveň, to znamená, že všechny nečistoty byly odstraněny. [8]

4 Praktická část

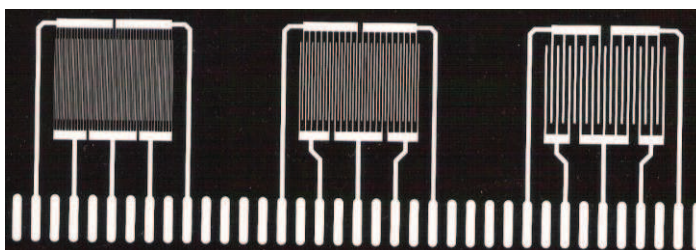
4.1 Výroba zkušebních vzorků a šablony

Pro výrobu zkušebních substrátů s testovacími obrazci, které jsou definované dle IPC-B-25, byl použit materiál FR4 s měděnou plochou. Výčet specifických vlastností použitého materiálu je zachycen v Tab. 5. Pro výrobu šablony na šablonový tisk byl použit bronzový plech o velikosti 7×15 cm a tloušťce 100 μm. Pro šablonu byly navrženy apertury odpovídající měřicímu substrátu s velikostmi 3×0,5 mm a 3×0,25 mm.

Tab. 5: Výčet základních parametrů použitého materiálu

Parametry		Hodnota
Typ základního materiálu		FR4
Výrobce		Isola
Tloušťka základního materiálu		1,55 mm
Tloušťka naplátované mědi		18 μm
Teplota skelného přechodu		110 – 150 °C
Minimální pevnost		0,7 N/mm
Standardní pevnost		1,05 N/mm
Minimální vnitřní měrný odpor	po vlhkosti	1·10 ⁶ MΩ·cm
Minimální povrchový měrný odpor		1·10 ⁴ MΩ·cm
Maximální absorpce vlhkosti		0,8 %
Permitivita při 1MHz		5,4
Ztrátový činitel při 1MHz		0,035
Pevnost v ohybu	podélná	415 N/mm ²
	příčná	345 N/mm ²

První operací bylo vytvoření návrhu pro filmové předlohy. Návrh byl proveden v navrhovacím systému DPS od firmy Eagle. Dalším krokem bylo vytvoření filmových předloh. Jelikož v laboratoři máme k dispozici negativní fotorezist, byla pro zkušební substrát vytvořena negativní filmová předloha, která je světlu propustná, to znamená, že osvětlená místa zpolymerují a po vyvolání zůstanou. Pro šablonu byly vytvořeny 2 pozitivní filmové předlohy, které jsou světlu nepropustné a po vyvolání se odstraní místa, které byly světlu nepropustné. Na vyrobení šablony byly použity 2 filmové předlohy z důvodu oboustranného leptání. Filmové předlohy výrobků vidíme na Obr. 16 a Obr. 17.



Obr. 16: Filmová předloha zkušební vzorku



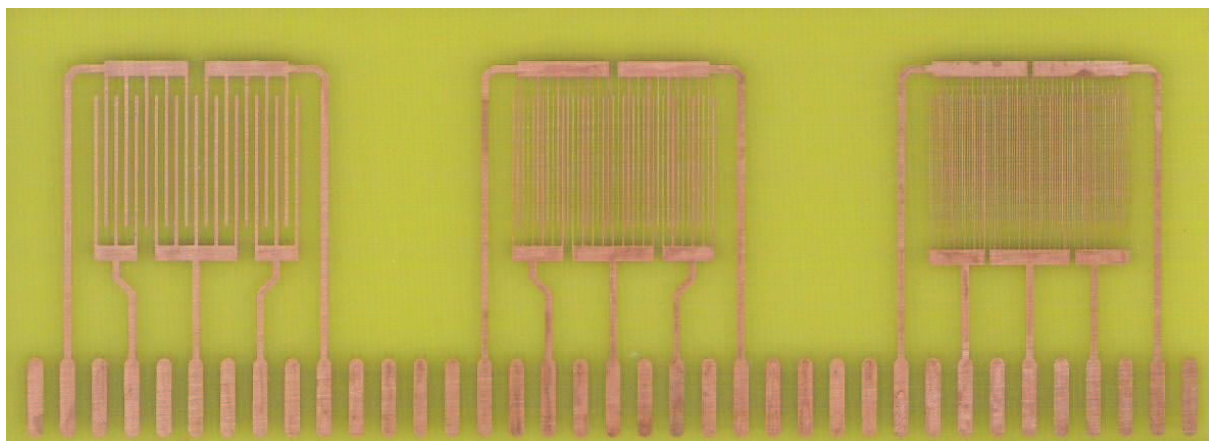
Obr. 17: Filmová předloha šablony

Druhou operací bylo čištění měděných povrchů desek a šablony, a následné sušení. Čistota měděných povrchů je základ vyrobení dobré DPS, protože ovlivňuje kvalitu dalších operací výrobního procesu, proto se povrchy musí kartáčovat ve vodě. Znakem čistého povrchu je dobrá smáčivost kapalinou, což se ověřuje oplachem vody. Jestliže je na desce nějaká nečistota, která ve výsledku vytváří masnou skvrnu a dané místo se nesmáčí, čistí se povrch, dokud není zajištěna smáčivost celého povrchu. Dobře vyčištěná deska se nechá vysušit v sušící peci při 70 °C. Sušení se provádí z důvodu nanášení fotorezistu, které je možné jen na suché povrchy. [15]

Po vysušení se substráty nalaminovaly a naexponovaly. Další operace probíhaly při žlutém osvětlení, aby nedošlo k předčasné expozici fotocitlivého materiálu. Laminování bylo provedeno pomocí laminovacího stroje za tepla. Zkušební desky byly nalaminovány z jedné strany, ale šablona se nechala nalaminovat z obou stran z důvodu oboustranného leptání. Další operací byla expozice v zařízení umožňující UV osvit fotorezistu definovanou vlnovou délkou za menšího podtlaku. Do expozičního zařízení byly vloženy substráty spolu s filmovými předlohami, které se musely sesouhlasit se substráty, zvláště se musely precizně sesouhlasit předlohy pro výrobu šablony, aby byly apertury přesné. Za pomoci mikroskopu bylo sesouhlasení předloh pro šablonu uděláno správně a mohla začít expozice po dobu 18 sekund. Pak se výrobky připravili na vyvolání.

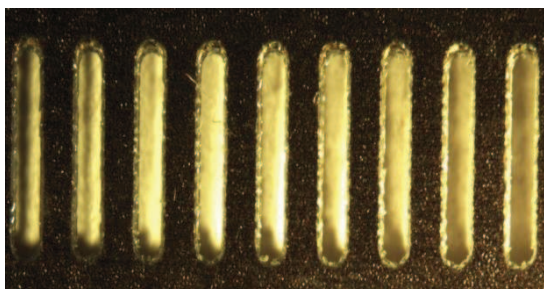
Vyvolání je přímá úprava desky před leptáním. Vyvolání probíhalo v 1 % roztoku uhličitanu sodného Na_2CO_3 , který se udržoval na teplotě 36 °C. Při této teplotě se roztok vyvolá v optimálním časovém intervalu. Kdybychom vyvolávali při nedodržení teploty roztoku, vyvolání by se časově prodloužilo. Před ponořením do lázně se odstranila ochranná fólie fotorezistu, která slouží jako ochrana před nečistotami, aby se nepoškodil fotorezist a expozice proběhla v pořádku. Výrobky byly ponořené do lázně, dokud se nevyvolal vodivý motiv. Aby při leptání nedošlo k nečekaným reakcím, byly substráty opláchnuty pod proudem vody.

Leptání mědi je operace vyžadující preciznost, ale i opatrnost, neboť při nepozornosti může dojít k podleptání substrátu a to vede ke ztrátě výrobku. Při leptání se používá lázeň, která se skládá z 1 dílu 30% peroxidu vodíku H_2O_2 , 3 dílů vody a 1 dílu 35% technické koncentrované kyseliny chlorovodíkové HCl . Tyto látky patří do skupiny nebezpečných látek a mohou při nedbalém zacházení způsobit poškození kůže a očí, proto je potřeba dodržovat bezpečnost práce a používat ochranné pomůcky. Leptání substrátů bylo provedeno v nádobě nepodléhající rozleptání. Leptací proces se dělá vlněním leptacího roztoku, tak dlouho dokud na substrátu zůstane už jen hotový vodivý motiv. Při procesu leptání se musí hlídat zhotovovaný motiv, aby nedošlo k tzv. podleptání.

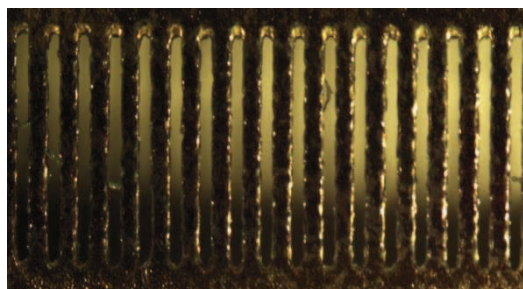


Obr. 18: Testovací vzorek

Závěrečnou operací bylo odstripování fotorezistu, které bylo docíleno v lázni z 10 % roztoku hydroxidu draselného KOH. Celá práce výroby zkušebních desek a šablony byla ukončena optickou kontrolou za použití mikroskopu. Optickou kontrolu šablony pozorujeme na Obr. 19 a Obr. 20. Výsledné produkty šablona a testovací vzorek jsou na Obr. 12 a Obr. 18.



Obr. 19: Optická kontrola apertury 1 šablony



Obr. 20: Optická kontrola apertury 2 šablony

4.2 Měření a vyhodnocování

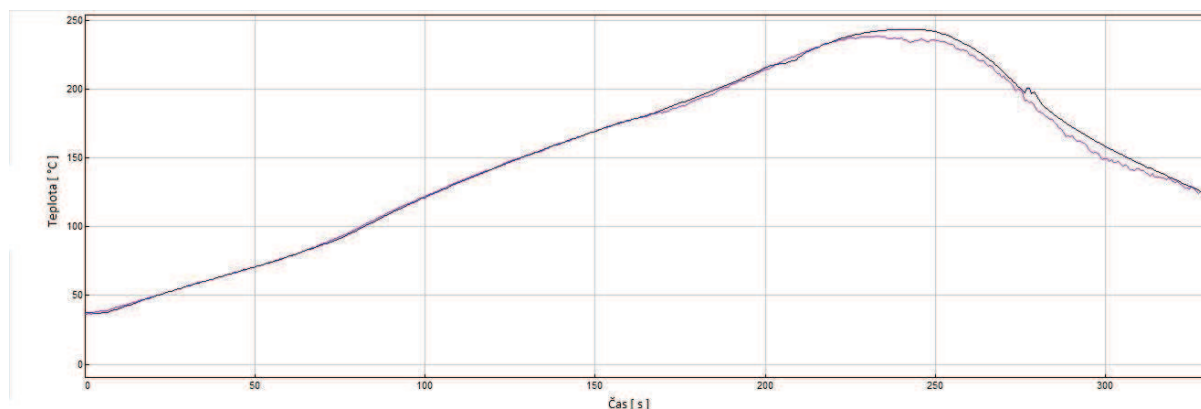
Pro testování byly použity 4 bezolovnaté pájecí pasty, jejichž výčet vlastností je v Tab. 6. Jak je patrné, pasty mají podobné hlavní vlastnosti, proto jsou ideální na srovnávání.

Tab. 6: Vlastnosti použitých pájecích past

Pájecí pasta / Vlastnosti	SAC305	SAC305	SAC305	SAC107
Složení	Sn96.5Ag3.0Cu0.5	Sn96.5Ag3.0Cu0.5	Sn96.5Ag3.0Cu0.5	Sn-1.0Ag-0.7Cu- Bi,In
Výrobce	Kester	SMIC	AIM	SMIC
Typ	NXG1	M705	NC 257-2	M40
Tavidlo	ROL1	ROL0	REL0	ROL1
Velikost částic [μm]	25 - 45	25 - 45	25 - 45	25 - 45
Obsah kovové složky [%]	88,5	88,5	88,5	88
Obsah tavidla [%]	11,5	11,5	11,5	12
Solidus [°C]	217	217	217	211
Liquidus [°C]	219	219	218	222

Pájecí pasty byly přetaveny v reflow peci DIMA SMR0, kterou vidíme na Obr. 21. Na peci byly nastaveny teplotní hodnoty jednotlivých zón 280 – 280 – 400 °C a rychlost posuvu 13 tj. $1,9 \text{ mm s}^{-1}$, které zajistili ideální teplotní profil pro přetavení zobrazený na Graf 1.

Graf 1: Nastavený teplotní profil



Obr. 21: Reflow pec DIMA SMR0

4.2.1 Měření a vyhodnocení vlivu pájecí pasty na povrchový izolační odpor metodou SIR

Měření bylo provedeno pro čistou DPS, po nanesení a přetavení pasty, po definované vlhkosti a elektromigraci. Pro měření po definované vlhkosti jsem nastavil vstupní parametry teplotu 35 °C, relativní vlhkost 85% a čas testu 24 hodin. Elektromigrační test probíhal 168 hodin při teplotě 35 °C, relativní vlhkosti 85% a napájecím napětí 20 V. Testovací vzorky byly propojeny mezi sebou připájenými dráty.

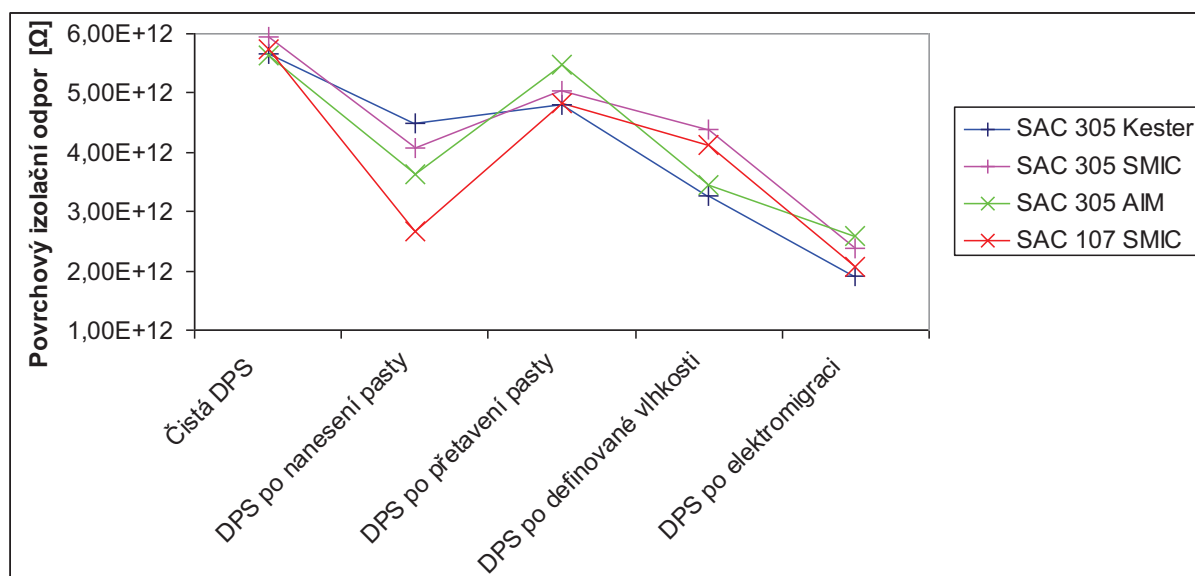
Pro testování změn izolačního odporu bylo definováno množství nanesené pájecí pasty reprezentující její hmotnost, ze které lze případně zjistit objem naneseného množství pájecí pasty a jednotlivých složek.

Pro měření byly použity pro každou pastu 3 testovací vzorky, na kterých lze pozorovat změny izolačního odporu. Výsledkem měření jsou tabulky změn hodnot izolačního odporu a porovnání z hodnotami udávaných výrobcem. Postup měření je vysvětlen v kapitole 3.1.

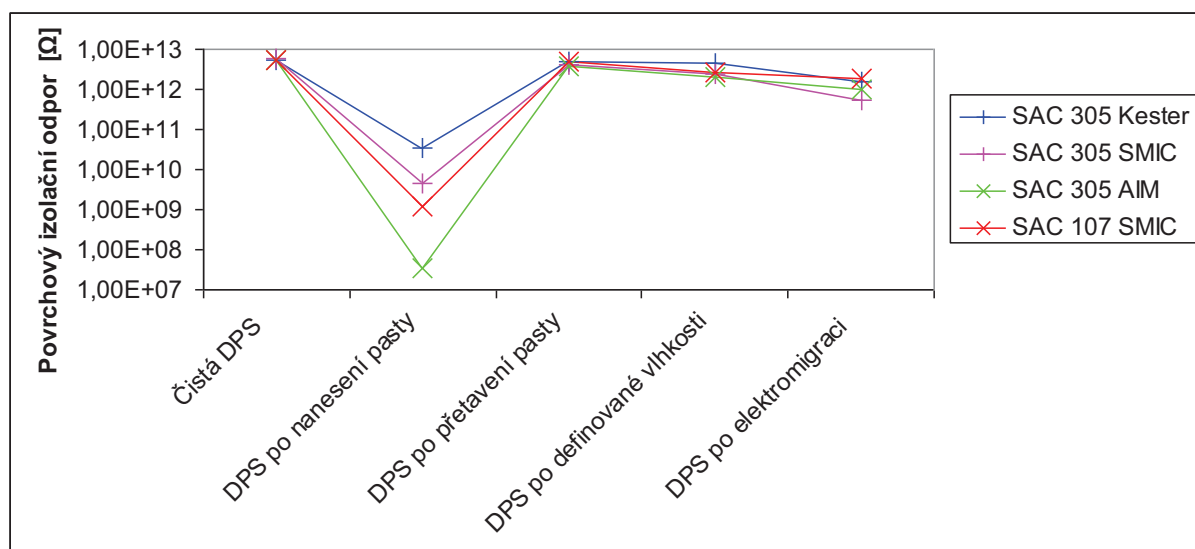
Tab. 7: Naměřené hodnoty povrchového izolačního odporu

			SAC305 Kester	SAC305 SMIC	SAC305 AIM	SAC107 SMIC
		Hmotnost nanesené pájecí pasty [mg]	144	125	122	144
Povrchový izolační odpor [Ω]	Motiv č. 1	Čistá DPS	5,67E+12	5,96E+12	5,63E+12	5,75E+12
		DPS po nanesení pasty	4,50E+12	4,08E+12	3,63E+12	2,68E+12
		DPS po přetavení pasty	4,81E+12	5,04E+12	5,47E+12	4,83E+12
		DPS po definované vlhkosti	3,27E+12	4,38E+12	3,45E+12	4,13E+12
		DPS po elektromigraci	1,91E+12	2,38E+12	2,59E+12	2,08E+12
	Motiv č. 2	Čistá DPS	5,33E+12	5,63E+12	5,17E+12	5,58E+12
		DPS po nanesení pasty	3,33E+10	4,36E+09	3,50E+07	1,18E+09
		DPS po přetavení pasty	4,90E+12	4,22E+12	3,93E+12	5,08E+12
		DPS po definované vlhkosti	4,35E+12	2,39E+12	1,98E+12	2,60E+12
		DPS po elektromigraci	1,49E+12	5,58E+11	1,04E+12	1,83E+12

Graf 2: Závislost změny izolačního odporu pro motiv č. 1



Graf 3: Závislost změny izolačního odporu pro motiv č. 2



Při měření jsem zjišťoval změnu izolačního odporu při změnách okolních podmínek, které mají vliv na tavidlové zbytky a tím na celou spolehlivost DPS. Nejvíce nás z hlediska výsledků zajímají změny hodnot izolačního odporu po definované vlhkosti a po elektromigraci. Hodnoty měření uvedené v Tab. 7 se více měnily u motivu č. 2, což je patrné na Graf 2 a Graf 3, protože rozteče a šířky spojů byly mnohem menší než u motivu č. 1. Měření proběhlo pro běžné okolní podmínky. Tab. 7 uvádí průměrné hodnoty změřených vzorků, celé měření je zobrazeno v příloze A. Z naměřených hodnot a grafů vyplývá, že skutečná nejnižší hodnota izolačního odporu je po natištění pájecí pasty. Po přetavení pasty izolační odpor vzrůstá až na hodnotu izolačního odporu DPS. Při vlhkostním a elektromigračním testu se v důsledku působení teploty, vlhkosti a napětí zvyšuje vodivost na povrchu DPS a tím dochází ke snižování odporu.

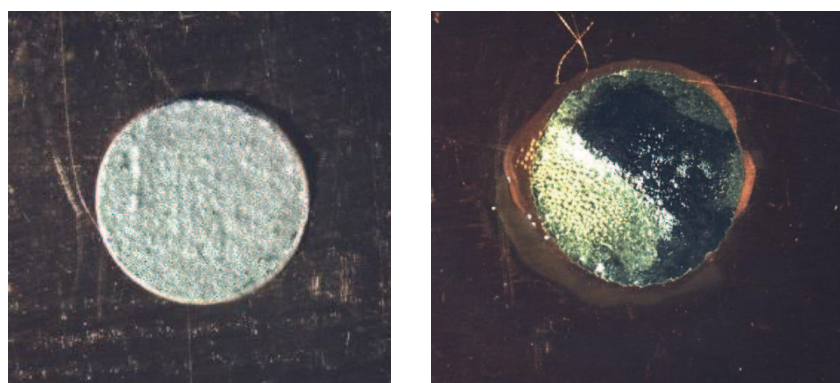
U všech třech pájecí past SAC 305 byly naměřené hodnoty po elektromigraci a definované vlhkosti v normě, protože výrobce udává hodnotu izolačního odporu $1 \times 10^9 \Omega$ a větší. Naměřené hodnoty se pohybovaly od 1×10^{11} až $5 \times 10^{12} \Omega$. Pájecí pasta SAC 107 rovněž vyhovovala, výrobce udává hodnotu izolačního odporu větší než $1 \times 10^9 \Omega$ a naměřené hodnoty se pohybovaly od 8×10^9 až $5 \times 10^{12} \Omega$.

4.2.2 Měření a vyhodnocení smáčecího úhlu

Důležitou vlastností pájecích past je roztékavost a smáčivost, které určují jeden z rysů míry spolehlivosti pájeného spoje. Při měření smáčecího úhlu se opticky hodnotí roztečení, ze kterého získáme smáčecí úhel. Ten nám udává, jak moc dobře se pájecí pasta smáčí.

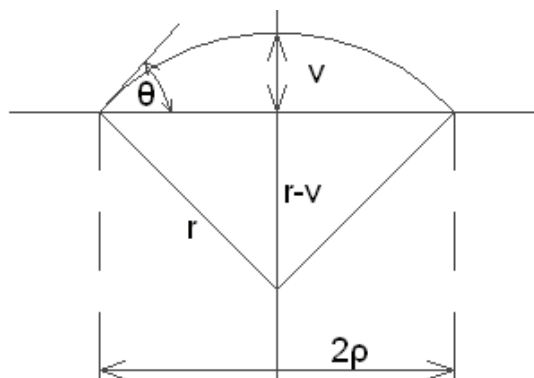
Pro vyhodnocení smáčecího úhlu pájecích past byly použity vzorky z materiálu FR4 jehož vlastnosti jsou popsány v tabulce Tab. 5. Vzorky prošly kartáčovacím, sušicím procesem uvedeným v kapitole 4.1, který zajistil mechanické očištění. Následně byly vzorky chemicky ošetřeny pomocí lázně mikroleptu, který zajistil odstranění oxidů z povrchu vzorků a tím došlo i ke zlepšení smáčivosti.

Po natisknutí pájecí pasty a přetavení se pomocí mikroskopu Olympus SZ61 při dvacetinásobném zvětšení a software Olympus zjistil průměr roztečení. Pro každou pastu bylo změřeno 8 průměrů. U každého změřeného průměru byla pomocí Microsoft Excel vypočtena průměrná hodnota roztečení a směrodatná odchylka. Všechny naměřené a vypočtené hodnoty obsahuje Tab. 8. Natisknutí a roztečení pasty pozorujeme na Obr. 22.



Obr. 22: Hodnocení roztékavosti pájecí pasty po přetavení

Pro zjištění smáčecího úhlu využijeme výpočet přes kulový vrchlík, protože natisknutá pájka s definovaným objemem se přetaví do podoby kulového vrchlíku (Obr. 23). [5]



Obr. 23: Kulový vrchlík [5]

Smáčecí úhel lze vypočítat ze vzorce [5]:

$$\operatorname{tg} \Theta = \frac{2 \cdot \rho \cdot v}{\rho^2 - v^2} \quad (7)$$

kde $\operatorname{tg} \Theta$ reprezentuje tangentu smáčecího úhlu, ρ udává poloměr kulového vrchlíku [m] a v představuje výšku kulového vrchlíku [m].

Výšku kulového vrchlíku odvodíme ze vztahu pro výpočet objemu kulového vrchlíku [5].

$$V = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot v \cdot (3 \cdot \rho^2 + v^2) \quad (8)$$

Po matematických úpravách dostaneme [5]:

$$v = \left(\frac{3 \cdot V}{\pi} + \sqrt{\left(\frac{3 \cdot V}{\pi} \right)^2 + \rho^6} \right)^{\frac{1}{3}} + \left(\frac{3 \cdot V}{\pi} - \sqrt{\left(\frac{3 \cdot V}{\pi} \right)^2 + \rho^6} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (9)$$

kde V udává objem kulového vrchlíku [m³], ρ udává poloměr kulového vrchlíku [m] a v představuje výšku kulového vrchlíku [m].

Při výpočtu objemu kulového vrchlíku vycházíme z neměnícího se objemu pasty před a po přetavení. Pasta byla natisknuta přes bronzovou šablonu tloušťky 150 μm a průměrem apertury 5 mm. Tloušťka šablony nám zároveň udává výšku natisknutého válce, jehož objem se vypočte ze vzorce [5]:

$$V_p = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot h \quad (10)$$

kde d reprezentuje průměr apertury [m] a h udává tloušťku šablony [m].

Vypočtený objem udává celkový objem pájecí pasty. Při zjišťování roztečení nás zajímá roztečení kovové složky, proto zjištěný objem se vynásobí hmotnostními procenty obsahu kovové složky v pájecí pastě a tím dostaneme objem pájky v pastě. Hmotnostní procenta pájky udává výrobce v technickém listu. Pro výpočet použijeme vztah [5]:

$$V_p = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot h \cdot V_{Sobj} \quad (11)$$

kde V_p udává objem natisknuté pasty [m^3], d reprezentuje průměr apertury [m] a h udává tloušťku šablony [m] a V_{sobj} udává objemová procenta pájky v pájecí pastě [%].

Tab. 8: Vyhodnocení roztékavosti a smáčecího úhlu

Pájecí pasta/ Roztečení [mm]	1	2	3	4	5	6	7	8	x	σ	Smáčecí úhel θ [°]
SAC305 Kester	5,24	5,29	5,15	5,19	5,15	5,11	5,20	5,24	5,2	0,06	10,8
SAC305 SMIC	5,2	5,2	5,3	6	5,6	5,5	5,5	5,2	5,44	0,26	10,5
SAC305 AIM	5,6	5,5	5,4	5,9	5,7	5,3	5,4	5,7	5,56	0,19	8,8
SAC107 SMIC	5,4	5,4	5,2	5,2	5,3	5,3	5,1	5,1	5,25	0,11	9,4

Posledním krokem je porovnání vypočtených smáčecích úhlů uvedených v Tab. 8, které jsem vypočítal podle vzorců (5) – (9). Porovnání jsem provedl podle Obr. 15 v kapitole 3.2. Z obrázku vyplývá, že všechny pájecí pasty vyhovují z hlediska smáčivosti, protože vypočtené úhly jsou v rozmezí $0 - 20^\circ$ a tedy odpovídají výbornému smáčení.

4.2.3 Měření a vyhodnocení ztrátového činitele tg a kapacity C

Měření probíhalo po přetavení pájecí pasty a kondicionování při teplotě 60°C po dobu 1 hodiny a po elektromigraci, která byla realizována v klimatické komoře při napájecím napětí 20V, při teplotě 35°C a při relativní vlhkosti 85 %.

Měření se provádělo pomocí měřidla Agilent 4284A, které zajišťuje měření kapacity a ztrátového činitele v širokém frekvenčním rozsahu, a software vytvářející makro v Microsoft Excel zapisující výsledky měření. Měření probíhalo po dobu 41 cyklů, kdy každý cyklus značil změnu frekvence při okolních podmínkách teplotě vzduchu $23,9^\circ\text{C}$ a relativní vlhkosti vzduchu 31 %.

Výsledkem je grafické znázornění změny kapacity a ztrátového činitele v závislosti na změně frekvence a tabulka srovnání hodnot pro důležité frekvence. Pro měření bylo použito pro každou pastu tři testovací vzorky a čistá DPS.

Tab. 9: Srovnání rozdílů kapacity a ztrátového činitele pro nízké a vysoké kmitočty pájecí pasty SAC 305 Kester

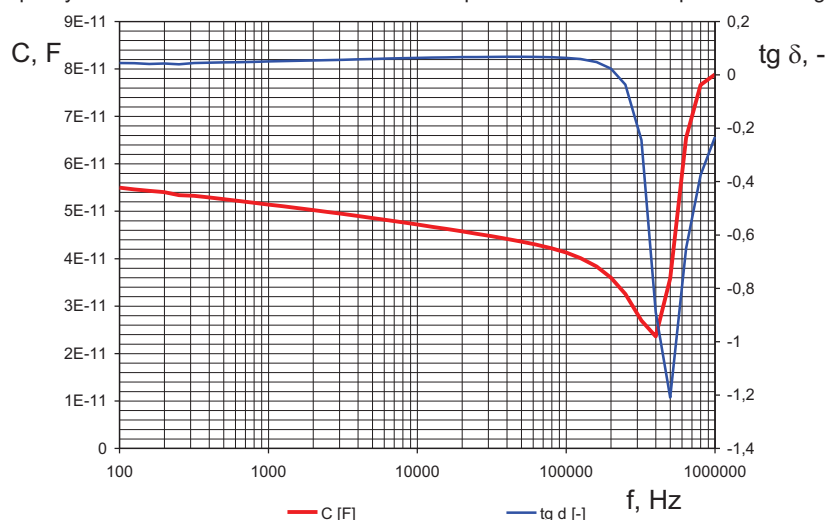
Motiv č. 1						
	Před elektromigrací		Po elektromigraci		Rozdíl	
f [Hz]	C [F]	tg δ [-]	C [F]	tg δ [-]	ΔC [F]	$\Delta \text{tg } \delta$ [-]
100	5,68151E-11	0,05575	1,78E-11	0,354391	3,90648E-11	0,298641
500	5,30141E-11	0,064881	1,2E-11	0,094816	4,10372E-11	0,029935
1000	5,1397E-11	0,068976	1,12E-11	0,113847	4,02342E-11	0,044871
5000	4,78279E-11	0,088558	9,98E-12	0,119592	3,78461E-11	0,031035
100k	4,68663E-11	0,084971	8,86E-12	0,085342	3,80017E-11	0,000371
500k	4,24598E-11	0,082774	9,62E-12	0,044444	3,28407E-11	0,038329
1M	4,00725E-11	0,073126	9,29E-12	0,03339	3,07841E-11	0,039736
Motiv č. 2						
	Před elektromigrací		Po elektromigraci		Rozdíl	
f [Hz]	C [F]	tg δ [-]	C [F]	tg δ [-]	ΔC [F]	$\Delta \text{tg } \delta$ [-]
100	6,47833E-11	0,039354	1,17E-11	4,051812	5,31246E-11	4,012458
500	6,20678E-11	0,05432	1,43E-11	0,248242	4,77296E-11	0,193922
1000	6,05557E-11	0,053147	1,41E-11	0,117009	4,64171E-11	0,063862
5000	5,70606E-11	0,056729	1,38E-11	0,043429	4,32157E-11	0,0133
100k	5,56275E-11	0,058369	1,43E-11	0,018434	4,12919E-11	0,039935
500k	5,18959E-11	0,059252	1,29E-11	0,004787	3,89709E-11	0,054465
1M	4,93615E-11	0,05486	1,19E-11	0,005093	3,74903E-11	0,049768

Tab. 10: Srovnání rozdílů kapacity a ztrátového činitele pro nízké a vysoké kmitočty pájecí pasty SAC 305 SMIC

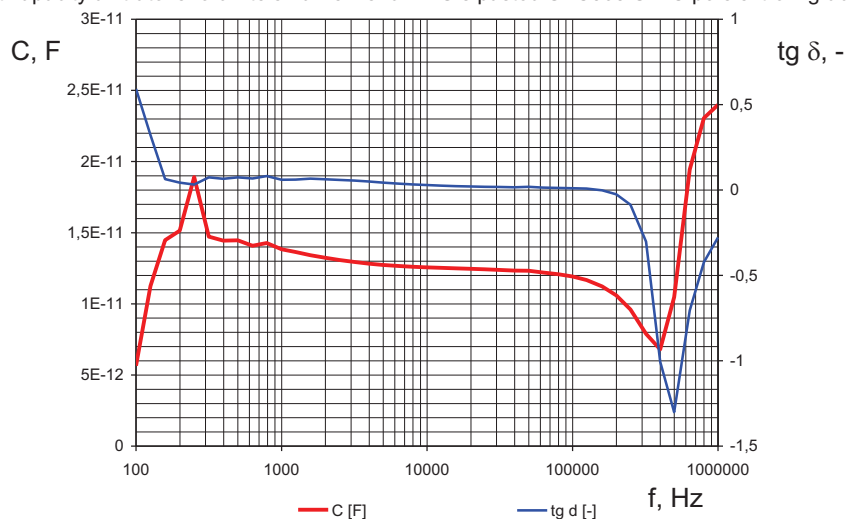
Motiv č. 1						
	Před elektromigrací		Po elektromigraci		Rozdíl	
f [Hz]	C [F]	tg δ [-]	C [F]	tg δ [-]	ΔC[F]	Δ tg δ [-]
100	5,49928E-11	0,044528	5,65E-12	0,592129	4,93432E-11	0,547601
500	5,25527E-11	0,046758	1,45E-11	0,073667	3,80837E-11	0,026909
1000	5,14007E-11	0,050251	1,38E-11	0,060252	3,75635E-11	0,010002
5000	4,85608E-11	0,059662	1,27E-11	0,043434	3,58308E-11	0,016229
100k	4,72072E-11	0,063576	1,26E-11	0,02874	3,46458E-11	0,034836
500k	4,36113E-11	0,06774	1,23E-11	0,018616	3,12813E-11	0,049124
1M	4,1297E-11	0,063769	1,19E-11	0,010401	2,93764E-11	0,053368

Motiv č. 2						
	Před elektromigrací		Po elektromigraci		Rozdíl	
f [Hz]	C [F]	tg δ [-]	C [F]	tg δ [-]	ΔC[F]	Δ tg δ [-]
100	6,43E-11	0,04502	2,09E-11	0,025541	4,33805E-11	0,019479
500	6,12E-11	0,043032	2,1E-11	0,021138	4,01422E-11	0,021894
1000	6E-11	0,044683	2,04E-11	0,009029	3,95596E-11	0,035654
5000	5,71E-11	0,052228	2,03E-11	0,008064	3,68156E-11	0,044165
100k	5,57E-11	0,055878	2,02E-11	0,009644	3,5501E-11	0,046234
500k	5,19E-11	0,060042	1,98E-11	0,011521	3,21064E-11	0,048521
1M	4,93E-11	0,056001	1,92E-11	0,01047	3,01184E-11	0,045531

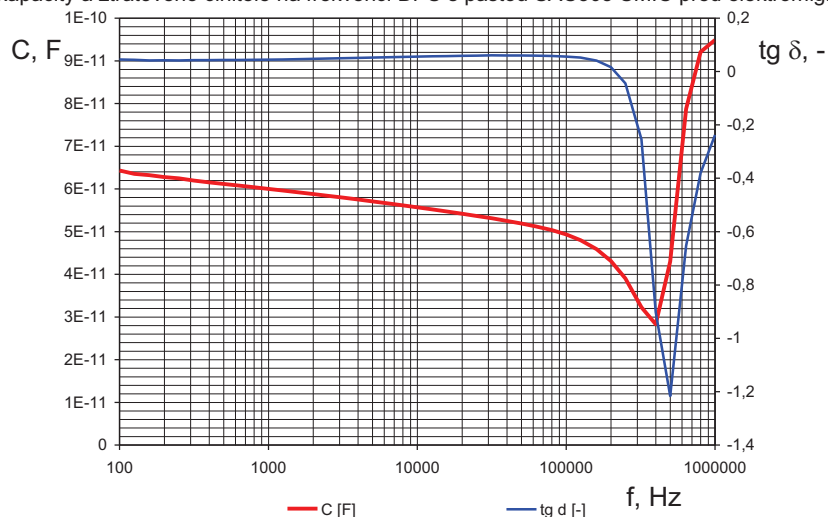
Graf 4: Závislost kapacity a ztrátového činitele na frekvenci DPS s pastou SAC305 SMIC před elektromigrací pro motiv č. 1



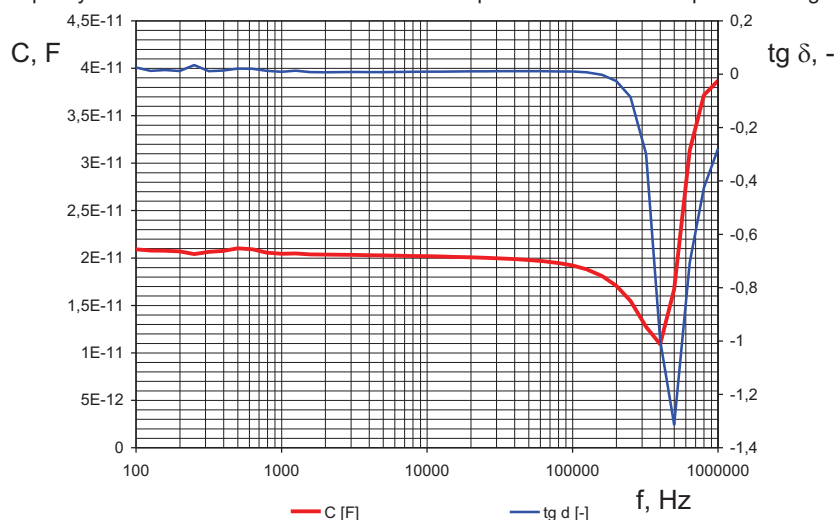
Graf 5: Závislost kapacity a ztrátového činitele na frekvenci DPS s pastou SAC305 SMIC po elektromigraci pro motiv č. 1



Graf 6: Závislost kapacity a ztrátového činitele na frekvenci DPS s pastou SAC305 SMIC před elektromigrací pro motiv č. 2



Graf 7: Závislost kapacity a ztrátového činitele na frekvenci DPS s pastou SAC305 SMIC po elektromigraci pro motiv č. 2



Tab. 11: Srovnání rozdílů kapacity a ztrátového činitele pro nízké a vysoké kmitočty pájecí pasty SAC 305 AIM

Motiv č. 1						
	Před elektromigrací		Po elektromigraci		Rozdíl	
f [Hz]	C [F]	tg δ [-]	C [F]	tg δ [-]	ΔC[F]	Δ tg δ [-]
100	5,77667E-11	0,04984	2,08E-11	0,037897	3,69287E-11	0,011943
500	5,45701E-11	0,055933	1,7E-11	0,015973	3,76079E-11	0,03996
1000	5,30388E-11	0,060371	1,65E-11	0,028718	3,65806E-11	0,031653
5000	4,96831E-11	0,061904	1,61E-11	0,035233	3,36129E-11	0,026671
100k	4,83087E-11	0,063558	1,59E-11	0,047791	3,24437E-11	0,015767
500k	4,47826E-11	0,065601	1,49E-11	0,070296	2,98483E-11	0,004695
1M	4,24599E-11	0,061529	1,4E-11	0,088775	2,84348E-11	0,027245
Motiv č. 2						
	Před elektromigrací		Po elektromigraci		Rozdíl	
f [Hz]	C [F]	tg δ [-]	C [F]	tg δ [-]	ΔC[F]	Δ tg δ [-]
100	6,5305E-11	0,043189	2,34E-11	0,133498	4,19065E-11	0,090309
500	6,2408E-11	0,043243	2,24E-11	0,055775	3,99933E-11	0,012532
1000	6,1162E-11	0,04667	2,03E-11	0,022602	4,08764E-11	0,024068
5000	5,7905E-11	0,055032	2E-11	0,035997	3,78896E-11	0,019034
100k	5,6438E-11	0,057463	2,01E-11	0,033177	3,63472E-11	0,024287
500k	5,2615E-11	0,060749	1,97E-11	0,018461	3,29241E-11	0,042287
1M	4,9982E-11	0,056848	1,91E-11	0,015213	3,09014E-11	0,041635

Tab. 12: Srovnání rozdílů kapacity a ztrátového činitele pro nízké a vysoké kmitočty pájecí pasty SAC 107 SMIC

Motiv č. 1						
	Před elektromigrací		Po elektromigraci		Rozdíl	
f [Hz]	C [F]	tg δ [-]	C [F]	tg δ [-]	ΔC[F]	Δ tg δ [-]
100	5,63554E-11	0,047911	2,9E-11	5,389614	2,7356E-11	5,341703
500	5,3677E-11	0,048627	1,21E-11	9,287358	4,1613E-11	9,23873
1000	5,25245E-11	0,05091	1,13E-11	4,76316	4,1244E-11	4,71225
5000	4,96824E-11	0,05827	1,32E-11	0,210781	3,651E-11	0,15251
100k	4,83374E-11	0,061725	1,31E-11	0,098974	3,5243E-11	0,037249
500k	4,47956E-11	0,065769	1,26E-11	0,040608	3,2184E-11	0,025161
1M	4,24595E-11	0,061948	9,28E-12	0,131255	3,3181E-11	0,069307
Motiv č. 2						
	Před elektromigrací		Po elektromigraci		Rozdíl	
f [Hz]	C [F]	tg δ [-]	C [F]	tg δ [-]	ΔC[F]	Δ tg δ [-]
100	6,48673E-11	0,044446	1,39E-11	0,836302	5,09895E-11	0,791856
500	6,2023E-11	0,041505	2,2E-11	0,069373	3,99847E-11	0,027868
1000	6,0886E-11	0,043889	2,21E-11	0,028689	3,87975E-11	0,0152
5000	5,7988E-11	0,051302	2,2E-11	0,020487	3,6016E-11	0,030815
100k	5,66066E-11	0,054579	2,18E-11	0,021073	3,47602E-11	0,033506
500k	5,28104E-11	0,060604	2,12E-11	0,025172	3,1577E-11	0,035432
1M	5,01375E-11	0,057307	1,98E-11	0,033847	3,03088E-11	0,023461

Tab. 9 až Tab. 12 uvádějí změny hodnot kapacity a ztrátového činitele pro nízké a vysoké frekvence. Změnu hodnot v celém definovaném frekvenčním rozsahu před elektromigrací i po ní zachycují Graf 4 až Graf 7. Tyto grafy zachycují změny hodnot pro pájecí pastu SAC 305 SMIC. Všechny grafické závislosti, zabývající se hodnocením změny kapacity a ztrátového činitele, jsou uvedené v příloze B.

Jelikož pájecí pasty mají rozdílné tavidla založena na různých chemických bázích, dochází u nich po elektromigraci k odlišným polarizačním mechanismům. Ztrátový činitel je dán dílčím součtem jednotlivých typů dielektrických ztrát, závisí na vodivosti, kmitočtu a teplotě a jiných faktorech. Při měření se ztrátový činitel měnil od 9 po 10^{-3} . Nejvíce se hodnoty měnily při nízkých frekvencích. Nejvýraznější změnu jsem zaznamenal u pájecí pasty SAC 107 SMIC při měření motivu č. 1, kde při nízkých frekvencích se tgδ měnil o tři řády, naopak nejmenší změnu jsem zpozoroval při měření motivu č. 2 u pájecí pasty SAC305 AIM. Největší hodnotu ztrátového činitele mají všechny pájecí pasty při kmitočtu 100 Hz.

Hodnota kapacity je hlavně závislá na relativní permitivitě. Její velikost určují polarizační mechanismy, blíže je vysvětleno v kapitole 3.2. Mezi kapacitou a relativní permitivitou je přímá úměra, to znamená, že ze vzrůstající kapacity roste hodnota relativní permitivity. Největší hodnotu kapacity jsem naměřil u pájecí pasty SAC305 Kester u motivu č. 2 při kmitočtu 100 Hz. Největší změny se projeví u pájecí pasty SAC305 Kester, naopak nejmenší změny hodnot kapacity jsem zaznamenal u pájecí pasty SAC305 AIM při měření motivu č. 1. Z měření vyplývá, že nejvíce vyrovnané polarizační mechanismy má pájecí pasta SAC305 AIM z důvodu nejmenšího rozptylu hodnot.

4.2.4 Měření a vyhodnocení ionizovatelných nečistot metodou SEC

Měření jsem provedl podle kapitoly 3.2. Na systém míchání byl použit dusík, který se pouštěl do testovací nádrže, kde uvolňoval iontové nečistoty a vytlačoval oxid uhličitý. Při měření byly ve vyluhu vždy 2 testovací vzorky po dobu 15 minut. Plocha jedné strany 2 desek byla 150 cm^2 a objem 2 desek 23520 mm^3 . Objem nádrže činil 700ml. Vodivost se měřila konduktometrem Radelkis OK 104 při teplotě 25°C .

Tab. 13 obsahuje změny vodivosti dosažených při měření množství ionizovatelných nečistot. Pomocí těchto hodnot tedy stanovíme množství ionizovatelných nečistot ze vzorce [9]:

$$Z = \frac{(\gamma_2 - \gamma_1) \cdot V}{S \cdot M} \quad (12)$$

kde Z udává množství ionizovatelných nečistot DPS [$\mu\text{gNaCl}/\text{cm}^2$], V reprezentuje objem roztoku [ml], S udává plochu jedné strany DPS [cm^2], γ_1 je počáteční vodivost roztoku s DPS [μScm^{-1}], γ_2 je vodivost kontaminovaného roztoku z DPS a k je směrnice určená ze směrnice kalibrační křivky s hodnotou 0,39 [$\mu\text{Scm}^{-1}/\mu\text{gNaClml}^{-1}$]. [9]

Tab. 13: Výsledky měření ionizovatelných nečistot

Pájecí pasta / Měření vodivosti [μScm^{-1}]	Samotný roztok	Roztok + 2 DPS bez pasty	Roztok + 2 DPS s pastou	Množství ionizovatelných nečistot DPS [$\mu\text{gNaCl}/\text{cm}^2$]	Množství ionizovatelných nečistot pájecí pasty [$\mu\text{gNaCl}/\text{cm}^2$]
SAC305 Kester	0,9	1,0	1,2	1,2	1,2
SAC305 SMIC	0,9	1,0	1,3	1,2	1,8
SAC305 AIM	0,9	1,0	1,3	1,2	1,8
SAC107 SMIC	0,9	1,0	1,7	1,2	4,2

Výrobci pájecích past se snaží ve výrobním procesu řízeně omezovat množství ionizovatelných nečistot v pájecích pastách, aby zajistili větší spolehlivost svého produktu. Problém nastává v protichůdných požadavcích, protože při snížení objemu ionizovatelných nečistot dochází ke zhoršení kvality smáčivosti a roztékavosti pájecí pasty.

Přijatelné množství ionizovatelných nečistot v pájecích pastách se uvádí podle normy 1,5 $\mu\text{gNaCl}/\text{cm}^2$. Z naměřených a vypočtených výsledků v Tab. 13 vyplývá, že optimální kontaminaci splňuje pouze pájecí pasta SAC305 od firmy Kester, ostatní pasty nevyhovují přijatelnému znečištění ionizovatelnými nečistotami.

Při porovnání množství ionizovatelných nečistot versus smáčecí úhel podle Tab. 8 a Tab. 13 jsem zjistil, že pájecí pasta SAC 305 Kester má sice nejmenší množství znečištění ionizovatelnými nečistotami, ale má největší úhel smáčení. Oproti tomu pájecí pasta SAC107 SMIC má nevyhovující množství znečištění nečistotami, ale má menší smáčecí úhel než pájecí pasta SAC 305 Kester.

5 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo seznámit s danou problematikou, navrhnout postup měření a studovat vliv tavidlových zbytků po pájení přetavením a nečistot na spolehlivost DPS. Vliv na spolehlivost byl proveden zkoumáním vlivu zbytků na povrchový izolační odpor, na změnu kapacity a ztrátového činitele, dále zkoumáním roztékavosti pájecích past a studiem množství znečištění ionizovatelnými nečistotami.

V této práci jsem rozebral základy problematiky spojené s pájecími pastami, tavidlovými zbytky a metodami měření zbytků tavidel. Popsal jsem proces pájení přetavením a funkci teplotního profilu. Přínosem této práce je zkoumání vlastností tavidlových zbytků a jejich dopad na výrobní proces DPS, což je aktuální téma, protože problematiku zbytků tavidel zkoumá řada světových firem a laboratoří z důvodu zkvalitnění výrobního procesu DPS v průmyslové oblasti. V praktické části jsem vyrobil zkušební vzorky pro měření a šablony pro šablonový tisk.

V experimentální části jsem pomocí školního vybavení zjišťoval závislost povrchového izolačního odporu na vlhkosti a elektromigraci. Dále jsem pozoroval změnu polarizačních mechanismů při měření relativní permitivity přes kapacitu a ztrátového činitele. Také jsem pomocí konduktometrické metody měřil množství nečistot v pájecích pastách a nakonec jsem prověřoval roztékavost a smáčecí úhel pájecích slitin. V úplném závěru jsem provedl vyhodnocení s technickými listy pájecích past.

Při porovnávání výsledků z měření vlivu pájecích past na povrchový izolační odpor s výsledky udávaných výrobcí jsem zjistil, že všechny měřené pájecí pasty vyhovují pro použití v průmyslu, protože jejich hodnoty byly v normě. Z hlediska smáčivosti jsou vyhovující všechny pasty, jelikož jejich vypočtené úhly se pohybovaly od 8 do 11 °, to odpovídá vynikajícímu smáčení. Z měření ztrátového činitele jsem zjistil, že polarizační mechanismy se nejméně projevily u pájecí pasty SAC 305 AIM, naopak nejvíce se projevily u pájecí pasty SAC 305 Kester. Změna ztrátového činitele byla nejvýraznější při kmitočtu 100 Hz u všech pájecích past. Největší závislost ztrátového činitele na kmitočtu a vlhkosti se projevila u pájecí pasty SAC 107 SMIC. Z výsledků měření množství ionizovatelných nečistot vyplývá, že vyhovující kritérium splnila jenom pasta SAC 305 Kester. Při měření množství ionizovatelných nečistot nesmělo dojít ke kontaktu DPS s rukama, aby nedošlo ke kontaminaci, proto je možné, že výsledky měření mohou být zkreslené. Z toho důvodu by bylo dobré pro další práci ověřit výsledky opětovným měřením.

Dalším pokračováním v bakalářské práci a tím její rozšíření by mohlo být sledování vlivu elektrochemické migrace a koroze, testování roztékavosti pomocí SLUMP testů. Dále by se mohlo rozšířit elektromigrační test při změně vstupních podmínek zejména zvyšováním teploty na 85 až 160 ° a zvýšením napájecího napětí na 48 V.

Použité zdroje literatury

- [1.] **Abel, Martin.** *SMT - Technologie povrchové montáže.* Pardubice : Nakladatelství Platan, 2000. str. 246. 80-902733-1-9.
- [2.] **Jiráček, J., Autrata, R., Liedermann, K., Rozsivalová, Z., Sedlaříková, M.** *Materiály a technická dokumentace, část Materiály v elektrotechnice. Elektronické texty, Brno 2002.* str. 127.
- [3.] **Jiráček, J., Vaněk, J., Křivák, P., Rozsivalová, Z.** *Materiály a technická dokumentace, Laboratorní cvičení. Elektronické texty, Brno 2002.* str. 83.
- [4.] **Olejář, Martin.** fotocesta: domácí výroba desek plošných spojů (DPS). *elweb.cz.* [Online] 1999. [Citace: 30. 11. 2011.] <http://www.elweb.cz/clanky.php?clanek=101>.
- [5.] **PELC, M.** *Výzkum spolehlivost bezolovnatých pájených spojů – diplomová práce. Brno, 2011.* str. 80.
- [6.] **Příkrýl, P.** *Využití poloautomatického dávkovače ve flexibilní malosériové montáži.* Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. str. 37.
- [7.] **Pulec, J.** *Analýza vlivu pouzdření na izolační vlastnosti.* Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. str. 84.
- [8.] **Ruža, V.** *Pájení.* Praha : SNTL, 1988. str. 452. 04-216-88.
- [9.] **Salomon, M.** *Pájitelnost elektronických součástek.* Ostrava : ČSVTS Ostrava, 1985. stránky 143-154.
- [10.] **Starý, J.** *Montážní a propojovací technologie.* Brno : Skriptum VUT, 2010. str. 262.
- [11.] IPC-TM-650 2.3.25, Detection and Measurement of Ionizable Surface Contaminants by Resistivity of Solvent Extract (ROSE). [Online] 2001. [Citace: 8. 12. 2011.] http://www.ipc.org/4.0_Knowledge/4.1_Standards/test/2-3_2-3-25c.pdf.
- [12.] IPC-TM-650 2.6.3.6, Surface Insulation Resistance - Fluxes - Telecommunications. [Online] 2004. [Citace: 4. 12. 2011.] http://www.ipc.org/4.0_Knowledge/4.1_Standards/test/2-6-3-6.pdf.
- [13.] Lead-free SMT - Considerations in Developing a Reliable Soldering Process. *emsnw.* [Online] 2007. [Citace: 7. 12. 2011.] <http://www.emsnow.com/npps/story.cfm?ID=9039>.
- [14.] Pájecí slitiny. *COPTEL - Elektrotechnika.* [Online] 2009. [Citace: 30. 11. 2011.] <http://coptel.coptkm.cz/reposit.php?action=4&id=6091>.
- [15.] *Pragolab.* [Online] 2011. [Citace: 20. Listopad 2011.] <http://www.pragolab.cz/clanek/127/kapilarni-elektroforeza-1-cast-princip>.
- [16.] *SMT centrum.* [Online] Digital Solutions, 2008. [Citace: 10. 11. 2011.] <http://www.smtcentrum.cz/>.
- [17.] Soubor článků. [Online] <http://www.ami.ac.uk/>.
- [18.] Soubor článků. [Online] <http://www.residues.com/>.
- [19.] Soubor článků. [Online] <http://www.empf.org/>.

Seznam použitých zkratek a symbolů

DPS – Deska plošných spojů – Printed Circuit Boards

SIR - Surface Insulation Resistance – Povrchový izolační odpor

ROSE - Resistivity Of Solvent Extract – Odpor výluhu roztoku

SEC - Solvent Extract Conductivity – Vodivost roztoku výluhu

SMD - Surface Mount Device - Součástka pro povrchovou montáž

UV – Ultraviolet – Ultrafialové záření

IR - Infrared radiation – Infračervené záření

FR4 – Základní materiál na výrobu DPS

Příloha A: Naměřené hodnoty povrchového izolačního odporu

Tab. A1: Srovnání hodnot pro měření povrchového izolačního odporu pro pájecí pastu SAC305 Kester

Deska 1: Naneseo 144 mg pasty					
Motiv č. 1					
Segment		1-2	1-3	5-3	5-4
Povrchový izolační odpor [Ω]	Čistá DPS	6,0E+12	6,0E+12	6,0E+12	6,0E+12
	DPS po naneseo pasty	6,0E+12	6,0E+12	6,0E+12	6,0E+12
	DPS po přetavení pasty	5,00E+12	4,20E+12	4,20E+12	5,00E+12
	DPS po definované vlhkosti	2,0E+12	3,0E+12	1,80E+12	4,00E+12
	DPS po elektromigraci	1,00E+12	1,00E+12	1,30E+12	2,20E+12
Motiv č. 2					
Segment		1-2	1-3	5-3	5-4
Povrchový izolační odpor [Ω]	Čistá DPS	5,00E+12	5,00E+12	5,00E+12	5,00E+12
	DPS po naneseo pasty	2,00E+10	2,00E+10	2,00E+10	2,00E+10
	DPS po přetavení pasty	4,20E+12	4,20E+12	4,20E+12	4,20E+12
	DPS po definované vlhkosti	3,00E+12	3,00E+12	3,00E+12	3,00E+12
	DPS po elektromigraci	1,20E+12	2,60E+12	1,00E+12	0,80E+12
Deska 2: Naneseo 145 mg pasty					
Motiv č. 1					
Segment		1-2	1-3	5-3	5-4
Povrchový izolační odpor [Ω]	Čistá DPS	5,5E+12	5,5E+12	5,5E+12	5,5E+12
	DPS po naneseo pasty	3,0E+12	3,0E+12	4,0E+12	4,0E+12
	DPS po přetavení pasty	5,50E+12	5,50E+12	5,50E+12	5,50E+12
	DPS po definované vlhkosti	5,30E+12	5,30E+12	4,80E+12	5,00E+12
	DPS po elektromigraci	4,00E+12	4,80E+12	4,40E+12	2,00E+12
Motiv č. 2					
Segment		1-2	1-3	5-3	5-4
Povrchový izolační odpor [Ω]	Čistá DPS	5,00E+12	5,00E+12	5,00E+12	5,00E+12
	DPS po naneseo pasty	4,00E+10	4,00E+10	4,00E+10	4,00E+10
	DPS po přetavení pasty	5,00E+12	5,00E+12	5,00E+12	5,00E+12
	DPS po definované vlhkosti	4,80E+12	4,80E+12	4,80E+12	4,80E+12
	DPS po elektromigraci	4,00E+12	2,00E+12	2,00E+12	2,00E+12
Deska 3: Naneseo 142 mg pasty					
Motiv č. 1					
Segment		1-2	1-3	5-3	5-4
Povrchový izolační odpor [Ω]	Čistá DPS	5,5E+12	5,5E+12	5,5E+12	5,5E+12
	DPS po naneseo pasty	4,0E+12	4,0E+12	4,0E+12	4,0E+12
	DPS po přetavení pasty	4,2E+12	5,5E+12	3,8E+12	3,8E+12
	DPS po definované vlhkosti	2,0E+12	2,0E+12	2,0E+12	2,0E+12
	DPS po elektromigraci	6,00E+11	6,00E+11	5,00E+11	5,5E+11
Motiv č. 2					
Segment		1-2	1-3	5-3	5-4
Povrchový izolační odpor [Ω]	Čistá DPS	6,50E+12	6,50E+12	5,50E+12	5,50E+12
	DPS po naneseo pasty	4,00E+10	4,00E+10	4,00E+10	4,00E+10
	DPS po přetavení pasty	6,00E+12	6,00E+12	5,00E+12	5,00E+12
	DPS po definované vlhkosti	5,00E+12	6,00E+12	5,00E+12	5,00E+12
	DPS po elektromigraci	6,00E+11	5,50E+11	6,50E+11	5,00E+11

Tab. A2: Srovnání hodnot pro měření povrchového izolačního odporu pro pájecí pastu SAC305 SMIC

Deska 1: Naneseno 122 mg pasty					
Motiv č. 1					
Segment		1-2	1-3	5-3	5-4
Povrchový izolační odpor [Ω]	Čistá DPS	5,5E+12	5,5E+12	5,5E+12	5,5E+12
	DPS po nanesení pasty	5,00E+12	5,00E+12	5,00E+12	5,00E+12
	DPS po přetavení pasty	4,80E+12	4,80E+12	4,80E+12	4,80E+12
	DPS po definované vlhkosti	4,60E+12	4,00E+12	4,00E+12	4,00E+12
	DPS po elektromigraci	6,00E+11	6,00E+11	6,00E+11	6,00E+11
Motiv č. 2					
Segment		1-2	1-3	5-3	5-4
Povrchový izolační odpor [Ω]	Čistá DPS	5,00E+12	5,00E+12	5,5E+12	5,5E+12
	DPS po nanesení pasty	7,00E+09	7,00E+09	7,00E+09	3,00E+09
	DPS po přetavení pasty	4,00E+12	4,00E+12	4,80E+12	4,00E+12
	DPS po definované vlhkosti	2,00E+12	2,00E+12	4,00E+12	8,00E+11
	DPS po elektromigraci	5,00E+11	5,00E+11	6,00E+11	5,00E+11
Deska 2: Naneseno 126 mg pasty					
Motiv č. 1					
Segment		1-2	1-3	5-3	5-4
Povrchový izolační odpor [Ω]	Čistá DPS	6,0E+12	6,0E+12	6,5E+12	6,0E+12
	DPS po nanesení pasty	5,00E+12	2,00E+12	5,00E+12	5,00E+12
	DPS po přetavení pasty	5,00E+12	5,80E+12	5,00E+12	5,00E+12
	DPS po definované vlhkosti	3,80E+12	4,20E+12	3,80E+12	4,20E+12
	DPS po elektromigraci	3,00E+12	3,00E+12	3,00E+12	3,30E+12
Motiv č. 2					
Segment		1-2	1-3	5-3	5-4
Povrchový izolační odpor [Ω]	Čistá DPS	6,0E+12	5,5E+12	6,0E+12	5,5E+12
	DPS po nanesení pasty	8,00E+09	5,00E+09	2,00E+09	1,50E+09
	DPS po přetavení pasty	4,00E+12	4,00E+12	4,00E+12	4,00E+12
	DPS po definované vlhkosti	2,00E+12	2,00E+12	2,00E+12	2,00E+12
	DPS po elektromigraci	3,00E+11	2,80E+11	3,20E+11	4,60E+11
Deska 3: Naneseno 126 mg pasty					
Motiv č. 1					
Segment		1-2	1-3	5-3	5-4
Povrchový izolační odpor [Ω]	Čistá DPS	6,0E+12	6,0E+12	6,5E+12	6,5E+12
	DPS po nanesení pasty	3,00E+12	3,00E+12	3,00E+12	3,00E+12
	DPS po přetavení pasty	5,00E+12	5,50E+12	5,00E+12	5,00E+12
	DPS po definované vlhkosti	5,00E+12	5,50E+12	5,00E+12	4,50E+12
	DPS po elektromigraci	2,40E+12	3,80E+12	3,80E+12	3,80E+12
Motiv č. 2					
Segment		1-2	1-3	5-3	5-4
Povrchový izolační odpor [Ω]	Čistá DPS	5,5E+12	6,0E+12	6,0E+12	6,0E+12
	DPS po nanesení pasty	5,00E+09	3,80E+09	1,80E+09	1,20E+09
	DPS po přetavení pasty	4,00E+12	4,60E+12	4,60E+12	4,60E+12
	DPS po definované vlhkosti	4,00E+12	3,00E+12	8,50E+11	4,00E+12
	DPS po elektromigraci	7,00E+11	1,80E+12	1,80E+11	-

Tab. A3:Srovnání hodnot pro měření povrchového izolačního odporu pro pájecí pastu SAC305 AIM

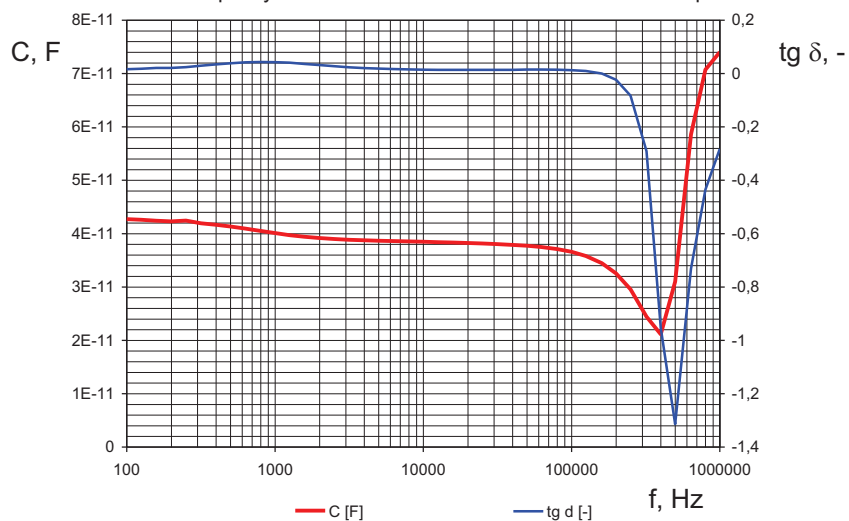
Deska 1: Naneseno 142 mg pasty					
Motiv č. 1					
Segment		1-2	1-3	5-3	5-4
Povrchový izolační odpor [Ω]	Čistá DPS	5,5E+12	5,5E+12	5,5E+12	5,5E+12
	DPS po nanesení pasty	5,00E+09	3,00E+12	5,00E+10	3,00E+12
	DPS po přetavení pasty	5,50E+12	5,50E+12	5,50E+12	5,50E+12
	DPS po definované vlhkosti	5,50E+12	5,50E+12	5,50E+12	5,50E+12
	DPS po elektromigraci	4,00E+12	5,00E+12	4,60E+12	4,80E+12
Motiv č. 2					
Segment		1-2	1-3	5-3	5-4
Povrchový izolační odpor [Ω]	Čistá DPS	4,00E+12	4,00E+12	4,00E+12	4,00E+12
	DPS po nanesení pasty	5,00E+07	5,00E+07	2,00E+07	2,00E+07
	DPS po přetavení pasty	4,00E+12	4,00E+12	4,00E+12	4,00E+12
	DPS po definované vlhkosti	6,50E+11	4,00E+12	4,00E+12	5,50E+11
	DPS po elektromigraci	5,00E+11	1,80E+12	9,50E+11	2,00E+11
Deska 2: Naneseno 133 mg pasty					
Motiv č. 1					
Segment		1-2	1-3	5-3	5-4
Povrchový izolační odpor [Ω]	Čistá DPS	5,5E+12	6,0E+12	6,0E+12	6,0E+12
	DPS po nanesení pasty	5,00E+11	5,00E+12	5,00E+12	5,00E+12
	DPS po přetavení pasty	5,00E+12	5,50E+12	6,00E+12	6,00E+12
	DPS po definované vlhkosti	6,00E+11	6,00E+11	6,50E+11	6,00E+11
	DPS po elektromigraci	3,80E+11	4,20E+11	4,40E+11	4,00E+11
Motiv č. 2					
Segment		1-2	1-3	5-3	5-4
Povrchový izolační odpor [Ω]	Čistá DPS	5,50E+12	5,50E+12	5,50E+12	5,50E+12
	DPS po nanesení pasty	4,00E+07	4,00E+07	2,00E+07	2,00E+07
	DPS po přetavení pasty	3,20E+12	3,20E+12	3,20E+12	3,20E+12
	DPS po definované vlhkosti	6,50E+11	6,50E+11	6,00E+11	6,00E+11
	DPS po elektromigraci	3,00E+11	4,60E+11	4,00E+11	4,00E+11
Deska 3: Naneseno 90 mg pasty					
Motiv č. 1					
Segment		1-2	1-3	5-3	5-4
Povrchový izolační odpor [Ω]	Čistá DPS	5,5E+12	5,5E+12	5,5E+12	5,50E+12
	DPS po nanesení pasty	5,50E+12	5,50E+12	5,50E+12	5,50E+12
	DPS po přetavení pasty	4,60E+12	5,50E+12	5,50E+12	5,50E+12
	DPS po definované vlhkosti	3,50E+12	4,50E+12	4,50E+12	4,50E+12
	DPS po elektromigraci	3,00E+12	3,00E+12	3,00E+12	2,00E+12
Motiv č. 2					
Segment		1-2	1-3	5-3	5-4
Povrchový izolační odpor [Ω]	Čistá DPS	6,00E+12	6,00E+12	6,00E+12	6,00E+12
	DPS po nanesení pasty	4,00E+07	4,00E+07	4,00E+07	4,00E+07
	DPS po přetavení pasty	4,80E+12	4,80E+12	4,40E+12	4,40E+12
	DPS po definované vlhkosti	2,50E+12	3,00E+12	4,00E+12	2,50E+12
	DPS po elektromigraci	1,50E+12	3,00E+12	3,00E+12	1,80E+10

Tab. A4:Srovnání hodnot pro měření povrchového izolačního odporu pro pájecí pastu SAC107 SMIC

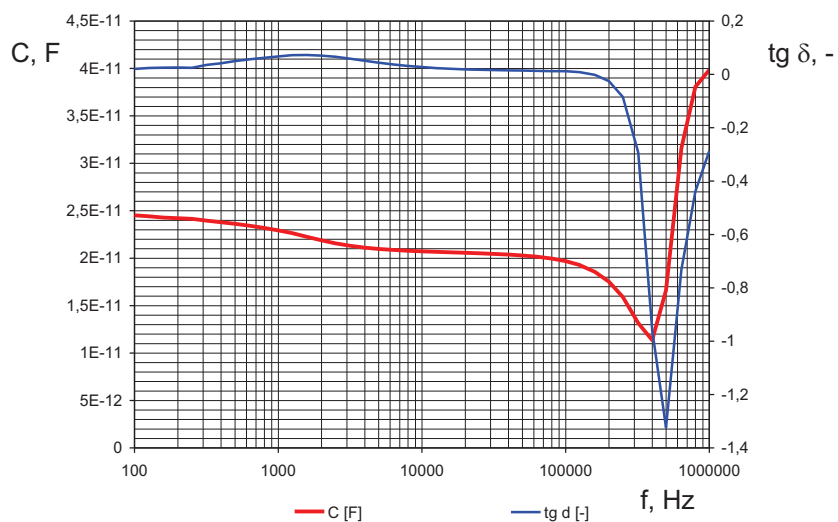
Deska 1: Naneseno 143 mg pasty					
Motiv č. 1					
Segment		1-2	1-3	5-3	5-4
Povrchový izolační odpor [Ω]	Čistá DPS	5,50E+12	5,50E+12	6,0E+12	6,0E+12
	DPS po nanesení pasty	5,00E+11	2,00E+12	2,00E+12	2,00E+12
	DPS po přetavení pasty	5,00E+12	5,00E+12	5,00E+12	5,00E+12
	DPS po definované vlhkosti	5,00E+12	5,00E+12	5,00E+12	5,00E+12
	DPS po elektromigraci	7,00E+11	7,00E+11	7,00E+11	5,50E+11
Motiv č. 2					
Segment		1-2	1-3	5-3	5-4
Povrchový izolační odpor [Ω]	Čistá DPS	5,50E+12	5,50E+12	5,50E+12	5,50E+12
	DPS po nanesení pasty	1,00E+09	1,00E+09	1,00E+09	5,00E+08
	DPS po přetavení pasty	5,00E+12	5,00E+12	5,00E+12	5,00E+12
	DPS po definované vlhkosti	5,00E+11	7,00E+11	5,00E+11	7,00E+11
	DPS po elektromigraci	3,50E+11	6,00E+11	3,00E+11	8,00E+09
Deska 2: Naneseno 133 mg pasty					
Motiv č. 1					
Segment		1-2	1-3	5-3	5-4
Povrchový izolační odpor [Ω]	Čistá DPS	5,50E+12	5,50E+12	5,50E+12	5,50E+12
	DPS po nanesení pasty	3,00E+11	3,00E+12	5,0E+12	5,0E+12
	DPS po přetavení pasty	4,00E+12	5,00E+12	5,00E+12	5,00E+12
	DPS po definované vlhkosti	3,00E+12	3,00E+12	4,00E+12	4,00E+12
	DPS po elektromigraci	2,00E+12	1,40E+12	2,40E+12	2,50E+12
Motiv č. 2					
Segment		1-2	1-3	5-3	5-4
Povrchový izolační odpor [Ω]	Čistá DPS	5,00E+12	5,50E+12	5,50E+12	5,00E+12
	DPS po nanesení pasty	2,00E+09	2,00E+09	8,00E+08	6,00E+08
	DPS po přetavení pasty	4,00E+12	5,00E+12	5,00E+12	5,00E+12
	DPS po definované vlhkosti	2,00E+12	2,00E+12	2,00E+12	3,80E+12
	DPS po elektromigraci	6,00E+11	6,00E+11	6,50E+11	1,50E+12
Deska 3: Naneseno 157 mg pasty					
Motiv č. 1					
Segment		1-2	1-3	5-3	5-4
Povrchový izolační odpor [Ω]	Čistá DPS	6,00E+12	6,00E+12	6,00E+12	6,00E+12
	DPS po nanesení pasty	3,00E+11	3,00E+12	4,00E+12	5,0E+12
	DPS po přetavení pasty	4,00E+12	5,00E+12	5,00E+12	5,00E+12
	DPS po definované vlhkosti	2,50E+12	4,00E+12	5,00E+12	4,00E+12
	DPS po elektromigraci	2,00E+12	3,40E+12	5,00E+12	3,60E+12
Motiv č. 2					
Segment		1-2	1-3	5-3	5-4
Povrchový izolační odpor [Ω]	Čistá DPS	6,00E+12	6,00E+12	6,00E+12	6,00E+12
	DPS po nanesení pasty	2,00E+09	2,00E+09	8,00E+08	4,00E+08
	DPS po přetavení pasty	5,00E+12	5,50E+12	5,50E+12	6,00E+12
	DPS po definované vlhkosti	4,00E+12	5,00E+12	5,00E+12	5,00E+12
	DPS po elektromigraci	3,60E+12	5,00E+12	4,00E+12	4,80E+12

Příloha B: Grafy závislosti kapacity a ztrátového činitele na frekvenci

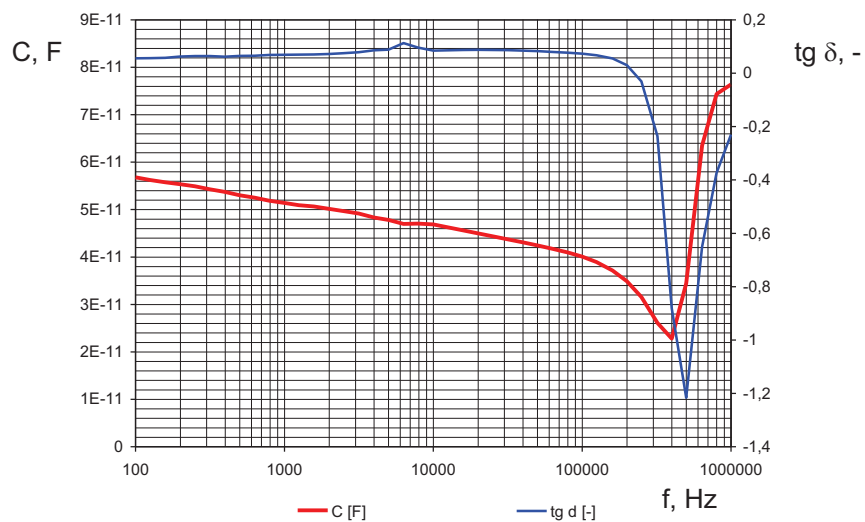
Graf B1: Závislost kapacity a ztrátového činitele na frekvenci čisté DPS pro motiv č. 1



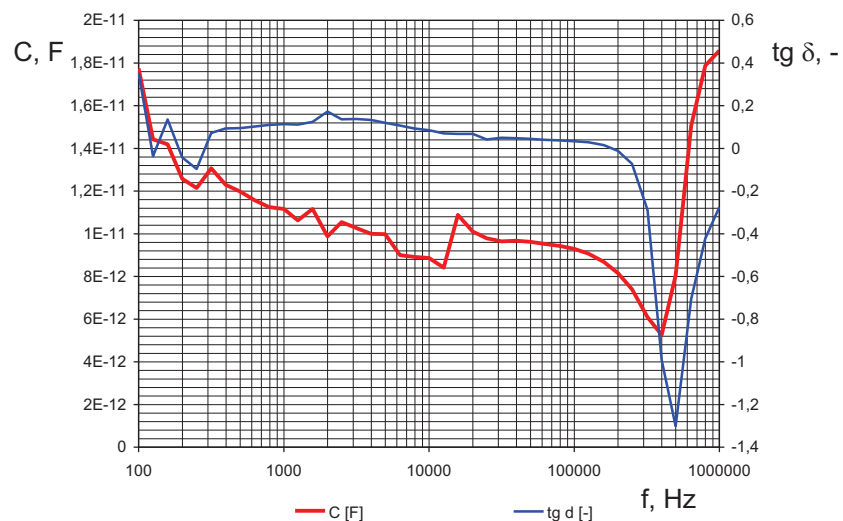
Graf B2: Závislost kapacity a ztrátového činitele na frekvenci čisté DPS pro motiv č. 2



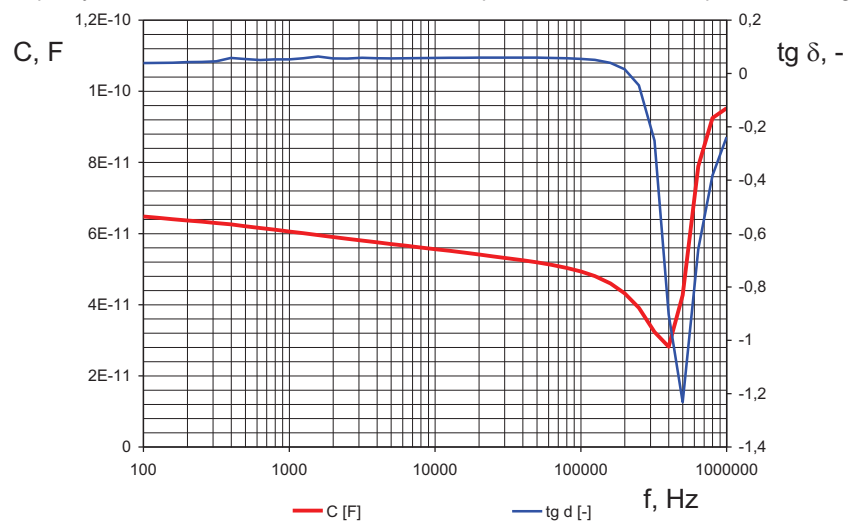
Graf B3: Závislost kapacity a ztrátového činitele na frekvenci DPS s pastou SAC305 Kester před elektromigrací pro motiv č. 1



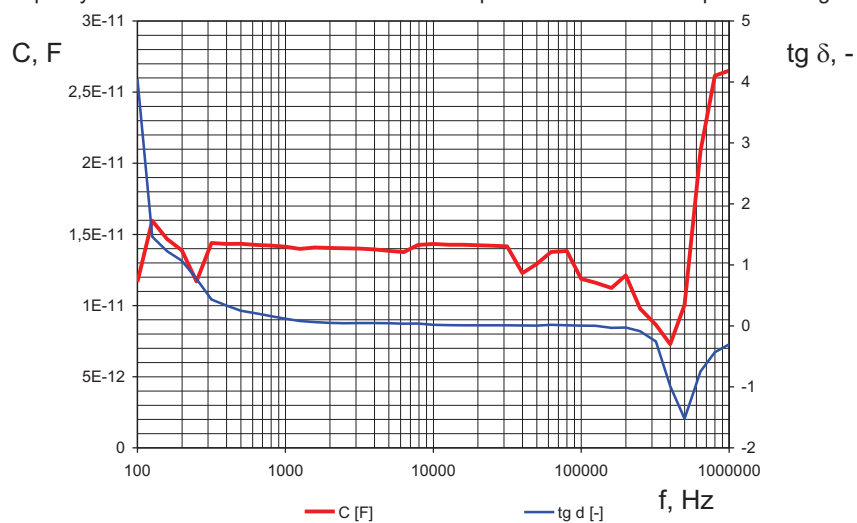
Graf B4: Závislost kapacity a ztrátového činitele na frekvenci DPS s pastou SAC305 Kester po elektromigraci pro motiv č. 1



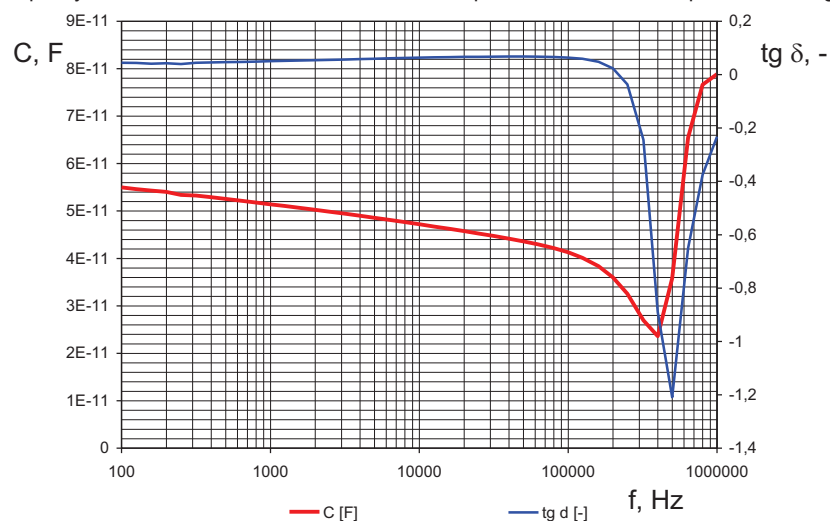
Graf B5: Závislost kapacity a ztrátového činitele na frekvenci DPS s pastou SAC305 Kester před elektromigrací pro motiv č. 2



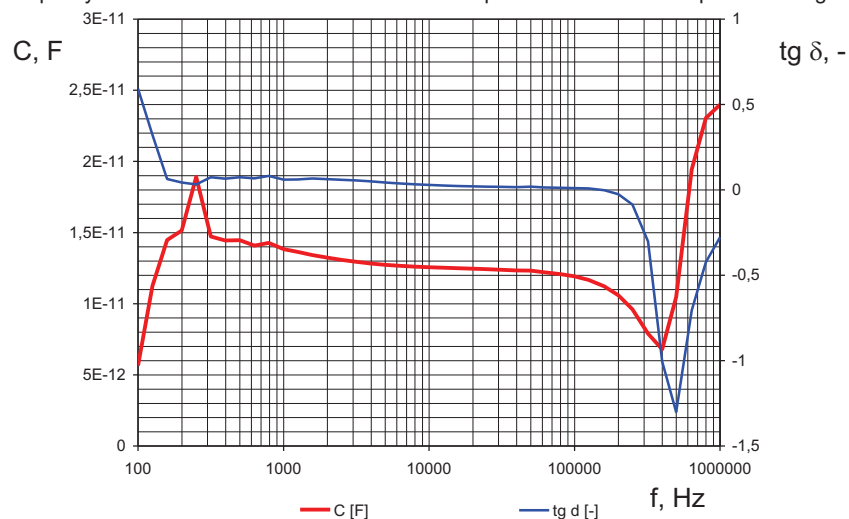
Graf B6: Závislost kapacity a ztrátového činitele na frekvenci DPS s pastou SAC305 Kester po elektromigraci pro motiv č. 2



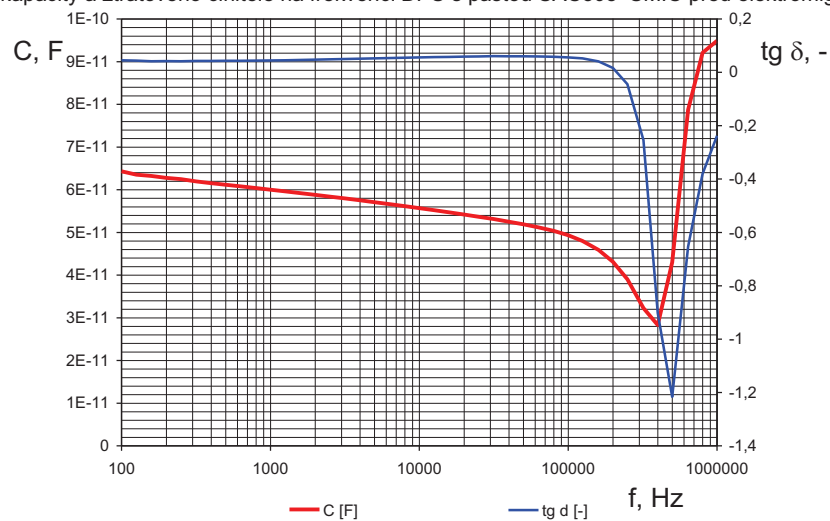
Graf B7: Závislost kapacity a ztrátového činitele na frekvenci DPS s pastou SAC305 SMIC před elektromigrací pro motiv č. 1



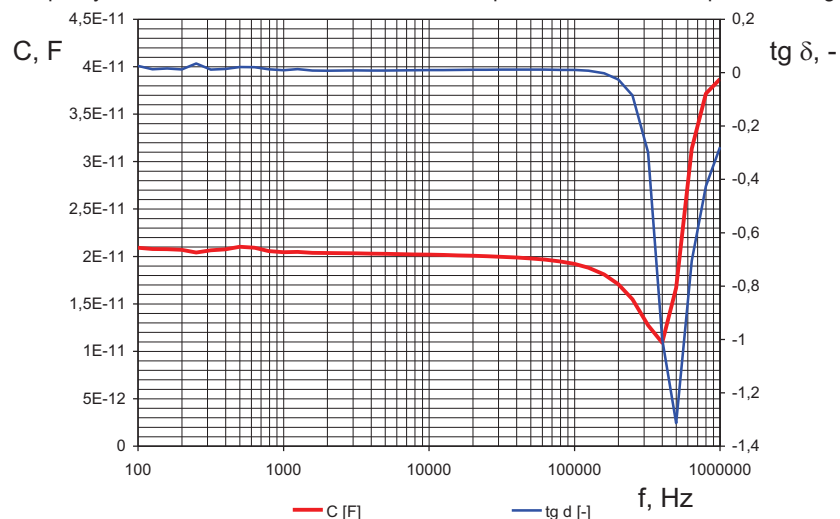
Graf B8: Závislost kapacity a ztrátového činitele na frekvenci DPS s pastou SAC305 SMIC po elektromigraci pro motiv č. 1



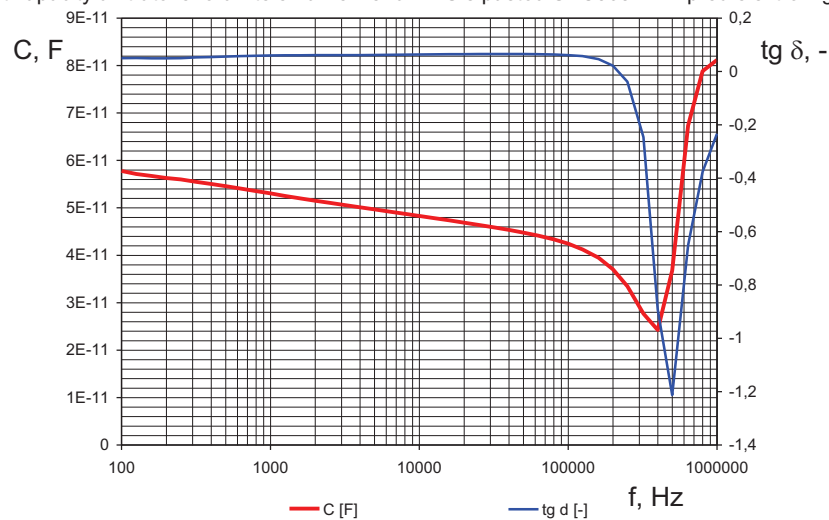
Graf B9: Závislost kapacity a ztrátového činitele na frekvenci DPS s pastou SAC305 SMIC před elektromigrací pro motiv č. 2



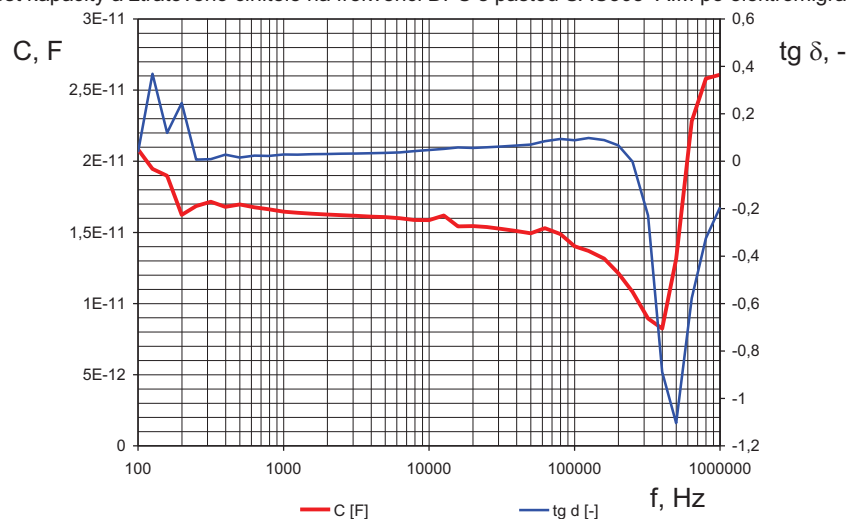
Graf B10: Závislost kapacity a ztrátového činitele na frekvenci DPS s pastou SAC305 SMIC po elektromigraci pro motiv č. 2



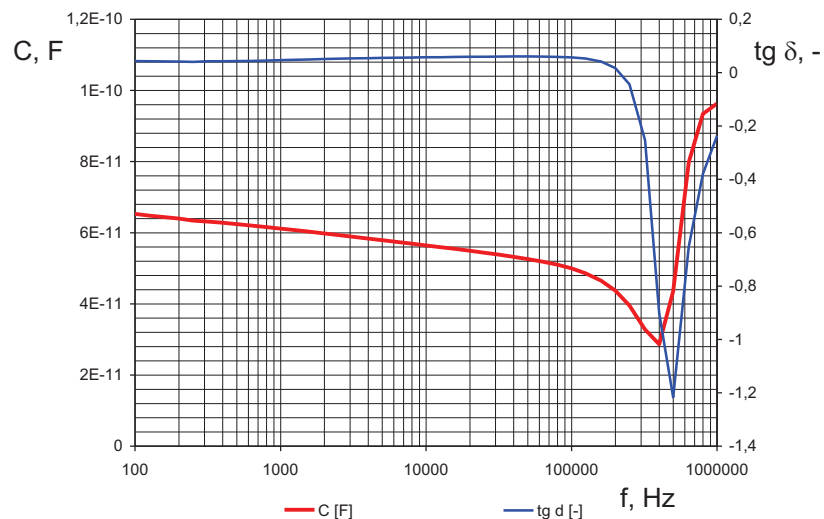
Graf B11: Závislost kapacity a ztrátového činitele na frekvenci DPS s pastou SAC305 AIM před elektromigrací pro motiv č. 1



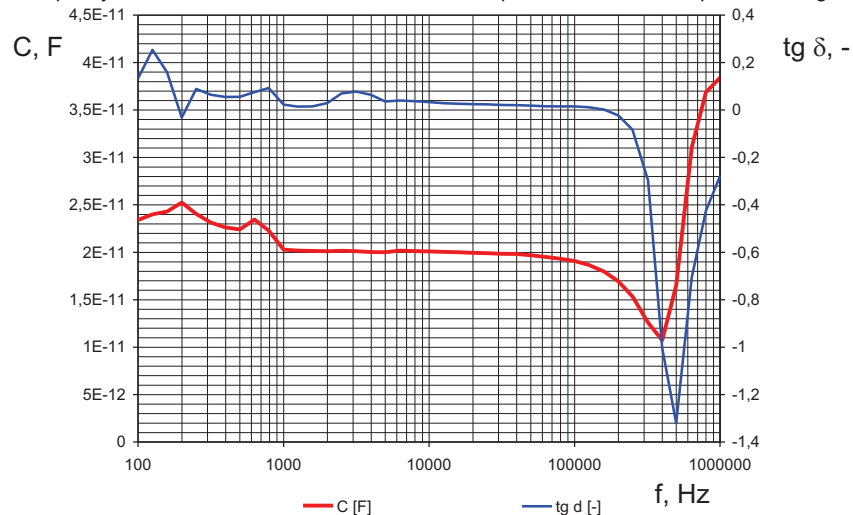
Graf B12: Závislost kapacity a ztrátového činitele na frekvenci DPS s pastou SAC305 AIM po elektromigraci pro motiv č. 1



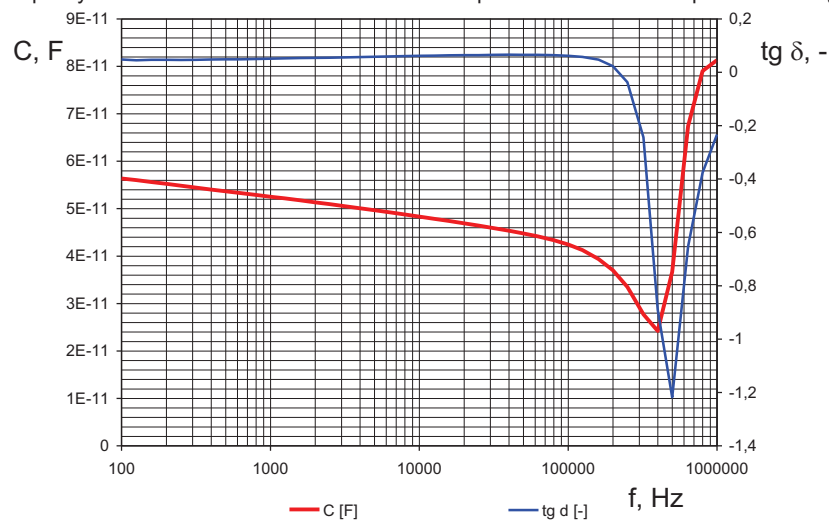
Graf B13: Závislost kapacity a ztrátového činitele na frekvenci DPS s pastou SAC305 AIM před elektromigrací pro motiv č. 2



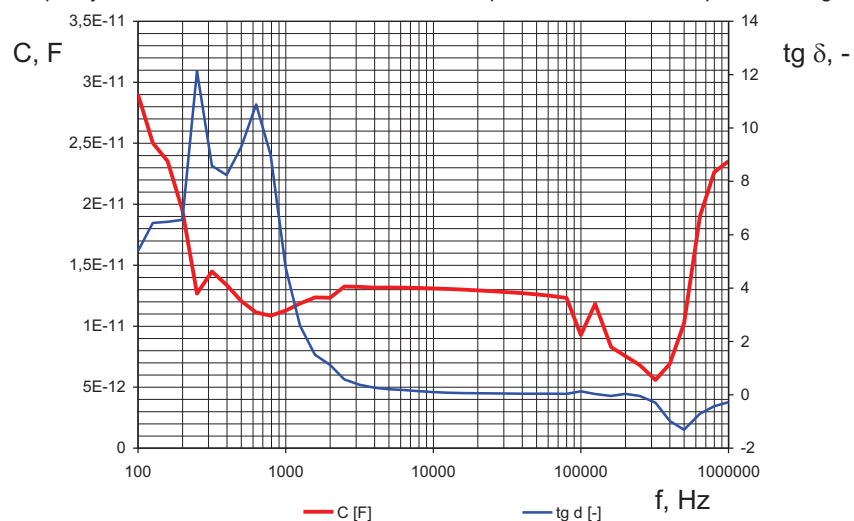
Graf B14: Závislost kapacity a ztrátového činitele na frekvenci DPS s pastou SAC305 AIM po elektromigraci pro motiv č. 2



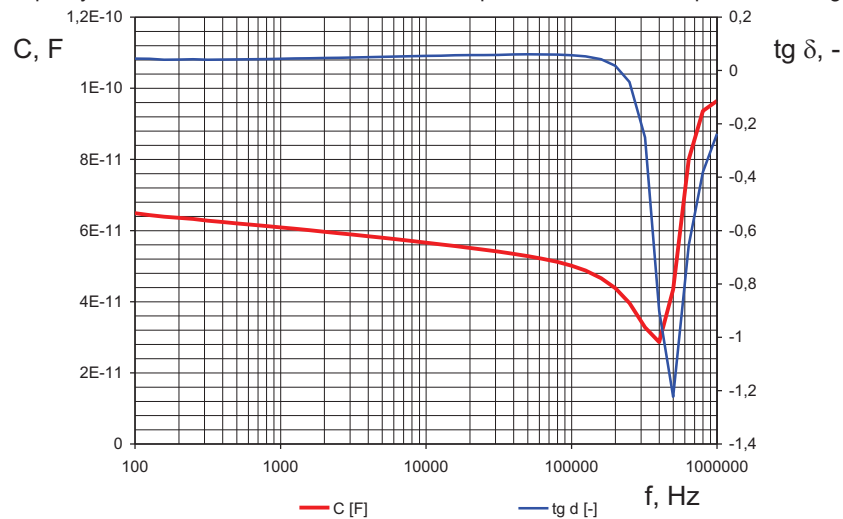
Graf B15: Závislost kapacity a ztrátového činitele na frekvenci DPS s pastou SAC107 SMIC před elektromigrací pro motiv č. 1



Graf B16: Závislost kapacity a ztrátového činitele na frekvenci DPS s pastou SAC107 SMIC po elektromigraci pro motiv č. 1



Graf B17: Závislost kapacity a ztrátového činitele na frekvenci DPS s pastou SAC107 SMIC před elektromigrací pro motiv č. 2



Graf B18: Závislost kapacity a ztrátového činitele na frekvenci DPS s pastou SAC107 SMIC po elektromigraci pro motiv č. 2

